

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mateja Špehar

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Aleksandar Sušić

Doc. dr. sc. Mario Kasović

Student:

Mateja Špehar

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorima, doc.dr.sc. Aleksandru Sušiću i doc.dr.sc. Mariu Kasoviću, na savjetima i pomoći pri izradi diplomskog rada.

Hvala obitelji i prijateljima na podršci tijekom studiranja.

Mateja Špehar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VII
SUMMARY	1
1. Uvod	2
1.1. Anatomija – glavne komponente kralješnice	2
1.1.1. Vratna (cervikalna) kralješnica	3
1.1.2. Prsna (torakalna) kralješnica	5
1.1.3. Slabinska (lumbalna) kralješnica	7
1.1.4. Križni (sakralni) i trtični dio kralješnice	7
1.1.5. Međukralješnički disk	8
1.2. Deformacije kralješnice	9
1.2.1. Kifoza	10
1.2.2. Lordoza	10
1.2.3. Skolioza	11
2. Biomehanika i kinematika kralješnice	13
3. Metoda rada i oprema	16
3.1. Mjerni sustav	17
3.2. Opis postupka	18
3.2.1. Kalibracija sustava	18
3.2.2. Uzimanje antropomjera ispitanika	19
3.2.3. Postavljanje pasivnih markera	19
3.2.4. Snimanje pokreta	20
3.2.5. Označavanje markera	22
3.2.6. Izrada protokola	22
3.2.7. Obrada podataka i analiza rezultata	23
4. Izrada protokola za analizu biomehanike kralješnice	24
5. Rezultati analize biomehanike kralješnice	32
5.1. Analiza stojećeg položaja	32
5.2. Analiza hoda	44
6. Zaključak	60
7. Literatura	61

POPIS SLIKA

Slika 1.1.	Segmenti kralješnice	3
Slika 1.2.	Vratni (cervikalni) dio kralješnice	4
Slika 1.3.	Atlas (C1)	4
Slika 1.4.	Axis (C2)	5
Slika 1.5.	Vratni (cervikalni) kralješak (C3-C7)	5
Slika 1.6.	Prsni (torakalni) dio kralješnice	6
Slika 1.7.	Prsni (torakalni) kralješak (T1-T12) – pogled sa strane i odozgo	6
Slika 1.8.	Slabinski (lumbalni) dio kralješnice	7
Slika 1.9.	Slabinski (lumbalni) kralješak (L1-L5)	7
Slika 1.10.	Sakralno trtični dio kralješnice	8
Slika 1.11.	Građa međuralješničkog diska	9
Slika 1.12.	Deformacije kralješnice	9
Slika 1.13.	1. Normalni oblik kralješnice, 2. Kralješnica s izraženom kifoza	10
Slika 1.14.	1. Normalni oblik kralješnice, 2. Kralješnica s izraženom lordozom	11
Slika 1.15.	Skolioza u frontalnoj i sagitalnoj ravnini	12
Slika 2.1.	Mobilni segment prema Junghannsu	13
Slika 2.2.	Prikaz tipične reakcije opterećenje - pomak funkcionalnog dijela kralješnice	15
Slika 3.1.	Simbolički prikaz obrade podataka u BTS SMART Analyzeru	17
Slika 3.2.	Shematski prikaz mjernog sustava	17
Slika 3.3.	Kalibracija sustava	18
Slika 3.4.	Uređaj za analizu sastava tjelesne mase	19
Slika 3.5.	Markeri i gumene trake	20
Slika 3.6.	Kamere u laboratoriju za biomehaniku ljudskog kretanja.....	20
Slika 3.7.	Radni prostor i platforma laboratorija za biomehaniku ljudskog kretanja	21
Slika 3.8.	Snimanje hodanja	21
Slika 4.1.	Označavanje markera u BTS Bioengineering Elite programskom paketu.....	25
Slika 4.2.	Operator za unos varijable	26
Slika 4.3.	Operator 3D sile	26
Slika 4.4.	Operator 3D momenta	26
Slika 4.5.	Operator 1D kuta	27
Slika 4.6.	Operator 3D kuta	27
Slika 4.7.	Operator referentnog sustava.....	28
Slika 4.8.	Zapis protokola u BTS SMART Analyzeru – sile.....	28
Slika 4.9.	Zapis protokola u BTS SMART Analyzeru – momenti i kutovi	29
Slika 4.10.	Zapis protokola u BTS SMART Analyzeru – kutovi i torzija	30
Slika 4.11.	Koordinatni sustav.....	31
Slika 5.1.	X komponenta sile u markerima u 5. sekundi stajanja.....	32
Slika 5.2.	Y komponenta sile u markerima u 5. sekundi stajanja	33
Slika 5.3.	Z komponenta sile u markerima u 5. sekundi stajanja	33
Slika 5.4.	X komponenta momenta u 5. sekundi stajanja	34
Slika 5.5.	Y komponenta momenta u 5. sekundi stajanja	34
Slika 5.6.	Z komponenta momenta u 5. sekundi stajanja.....	35
Slika 5.7.	Promjena sile u kralješku C7 za vrijeme stajanja	36
Slika 5.8.	Promjena momenta u kralješku C7 za vrijeme stajanja	37
Slika 5.9.	Sila platforme za vrijeme stajanja	38
Slika 5.10.	Moment platforme za vrijeme stajanja.....	39

Slika 5.11.	Položaj ramena u odnosu na vratnu kralješnicu	40
Slika 5.12.	Položaj zatiljka u odnosu na ramena i vratnu kralješnicu	41
Slika 5.13.	Položaj kralješka C7 u odnosu na prednje spine.....	42
Slika 5.14.	Položaj kralješka T6 u odnosu na prednje spine	43
Slika 5.15.	Položaj slabinskog dijela kralješnice u odnosu na prednje spine	44
Slika 5.16.	X komponenta sile u trenutku kontakta s platformom	45
Slika 5.17.	Y komponenta sile u trenutku kontakta s platformom	46
Slika 5.18.	Z komponenta sile u trenutku kontakta s platformom.....	47
Slika 5.19.	X komponenta momenta u trenutku kontakta s platformom	48
Slika 5.20.	Y komponenta momenta u trenutku kontakta s platformom	48
Slika 5.21.	Z komponenta momenta u trenutku kontakta s platformom.....	49
Slika 5.22.	Sila u smjeru y osi na stražnjim spinama	50
Slika 5.23.	Promjena sile u kralješku C7	51
Slika 5.24.	Promjena momenta u kralješku C7	52
Slika 5.25.	Promjena momenta u lijevom ramenu	53
Slika 5.26.	Promjena sile na platformi.....	54
Slika 5.27.	Promjena momenta na platformi.....	55
Slika 5.28.	Promjena položaja ramena u odnosu na vratnu kralješnicu	56
Slika 5.29.	Promjena položaja zatiljka u odnosu na ramena i vratnu kralješnicu	57
Slika 5.30.	Promjena položaja kralješka C7 u odnosu na prednje spine	58
Slika 5.31.	Torzija kralješnice.....	59

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Oznake, raspored i naziv markera korištenih za analizu biomehanike kralješnice	24
Tablica 5.1. Iznos x komponente sile u kralješcima	32
Tablica 5.2. Iznos y komponente sile u kralješcima	33
Tablica 5.3. Iznos z komponente sile u kralješcima	34
Tablica 5.4. Iznos x komponente momenta u kralješcima	34
Tablica 5.5. Iznos y komponente momenta u kralješcima	35
Tablica 5.6. Iznos z komponente momenta u kralješcima	35
Tablica 5.7. Iznos x komponente sile u trenutku kontakta s platformom	45
Tablica 5.8. Iznos y komponente sile u trenutku kontakta s platformom	46
Tablica 5.9. Iznos z komponente sile u trenutku kontakta s platformom	47
Tablica 5.10. Iznos x komponente momenta u trenutku kontakta s platformom	48
Tablica 5.11. Iznos y komponente momenta u trenutku kontakta s platformom	49
Tablica 5.12. Iznos z komponente momenta u trenutku kontakta s platformom	49

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>C1</i>	-	prvi vratni kralješak
<i>C4</i>	-	četvrti vratni kralješak
<i>C7</i>	-	sedmi vratni kralješak
<i>T6</i>	-	šesti prsni kralješak
<i>T12</i>	-	dvanaesti prsni kralješak
<i>L1</i>	-	prvi slabinski kralješak
<i>L3</i>	-	treći slabinski kralješak
<i>L5</i>	-	peti slabinski kralješak
<i>S1</i>	-	prvi križni kralješak
<i>S3</i>	-	treći križni kralješak
<i>DR</i>	-	desno rame
<i>LR</i>	-	lijevo rame
<i>DSS</i>	-	desna stražnja spina
<i>LSS</i>	-	lijeva stražnja spina
<i>DPS</i>	-	desna prednja spina
<i>LPS</i>	-	lijeva prednja spina
<i>Mk0</i>	-	marker na čelu
<i>Mk1</i>	-	marker na zatiljku
<i>Mk2</i>	-	marker na C1
<i>Mk3</i>	-	marker na C7
<i>Mk4</i>	-	marker na T6
<i>Mk5</i>	-	marker na prijelazu T12/L1
<i>Mk6</i>	-	marker na L3
<i>Mk7</i>	-	marker na prijelazu L5/S1
<i>Mk8</i>	-	marker na S3
<i>Mk9</i>	-	marker na desnom ramenu
<i>Mk10</i>	-	marker na lijevom ramenu
<i>Mk11</i>	-	marker na desnoj stražnjoj spini
<i>Mk12</i>	-	marker na lijevoj stražnjoj spini
<i>Mk13</i>	-	marker na desnoj prednjoj spini
<i>Mk14</i>	-	marker na lijevoj prednjoj spini
F_x	N	komponenta sile u smjeru osi x
F_y	N	komponenta sile u smjeru osi y
F_z	N	komponenta sile u smjeru osi z
M_x	Nm	komponenta momenta u smjeru osi x

M_y	Nm	komponenta momenta u smjeru osi y
M_z	Nm	komponenta momenta u smjeru osi z
α	°	kut između markera

SAŽETAK

Analiza biomehanike kretanja je neinvazivna metoda utvrđivanja opterećenja i položaja tijela pri izvođenju raznih pokreta. Pomoću optoelektroničkog mjernog sustava BTS Elite snima se željeni pokret ili položaj ispitanika.

Sustav se temelji na detekciji položaja pojedinih pasivnih (reflektirajućih) markera koji su postavljeni na točno određena mjesta na tijelu i označavaju položaje karakterističnih točaka tijela. Imajući u vidu mogućnosti i ograničenja mjernog sustava, te rezultate koji se žele dobiti, određeno je da se za analizu biomehanike kralješnice markeri postave na 15 točaka na tijelu. Nakon kalibriranja radnog prostora i uzimanja antropomjera ispitanika, postavljaju se markeri. Markeri su postavljeni na čelo, zatiljak, ramena, prvi i srednji kralješak svakog segmenta kralješnice (vratni, prsni, slabinski, križni), te na prednje i stražnje spine zdjelice.

Sustav zabilježava pokrete u trodimenzionalnom prostoru na način da se reflektirajući markeri (oblika kuglice) osvijetle bljeskom infracrvene svjetlosti čiji se izvor nalazi u kameri, te se odbijesak s markera detektira na senzoru u kameri. Snimljeni pokret ili položaj prvo se obrađuje pomoću BTS Bioengineering Elite programskog paketa gdje se izrađuje žičani model i označavaju markeri. Istim oznakama označavaju se markeri u žičanom modelu i markeri koje je mjerni sustav detektirao na ispitaniku. Svaki pokret snimljen s istim brojem i rasporedom markera označava se prema istom žičanom modelu. Nakon označavanja markera, slijedi izrada protokola.

Protokol je izrađen pomoću BTS SMART Analyzer programskog paketa. U protokolu za analizu biomehanike kralješnice korišteno je 39 operatora koji izračunavaju sile i momente u točkama označenim markerima, te kutove između njih. Kako bi se testirao protokol snimljeno je stajanje i hodaње ispitanika. Dobiveni rezultati pokazuju kolika su opterećenja i kakav je položaj određenih segmenata kralješnice u stojećem položaju i tijekom hodaња.

Analiza biomehanike kralješnice prema izrađenom protokolu daje uvid u nepravilnosti izvođenja pokreta, te eventualne deformacije kralješnice koje mogu nastati kao posljedica svakodnevnog ponavljanja tih pokreta. Izrađeni protokol za analizu biomehanike kralješnice omogućava uočavanje deformacija i nepravilnosti u ranoj fazi, što povećava mogućnosti oporavka.

Ključne riječi: biomehanika, kralješnica, analiza, protokol

SUMMARY

Motion biomechanics analysis is non-invasive method for determining load and posture during various motion. Optoelectronic measuring system BTS Elite is used to record chosen movement or posture.

System detects location of each passive (reflecting) marker which represents a characteristic point of the body. Considering capabilities and limitations of measuring system and obtained results, it is determined to place markers on 15 points of the body for the analysis of spinal biomechanics. After calibrating the work space and determining antropomeasures of the examinee, markers are being positioned. Markers are placed on the forehead, back of the head, shoulders, first and middle vertebra of each spinal segment (cervical, thoracic, lumbar and sacral) and front and back spines of the pelvis.

System detects motion in three-dimensional space by infrared light of reflecting (ball shaped) markers. Source of the light is in a camera, and reflection from markers is detected on the sensor positioned in the camera as well. Recorded motion or posture is first processed using BTS Bioengineering Elite software, where wired model is made and markers are tagged. The same tags are used for wired model markers and for the ones attached to the examinee and detected by the system. Every motion recorded with the same number and placement of markers is tagged using the same wired model. Tagging of the markers is followed by the actual protocol design, which is done by using BTS SMART Analyzer software.

Protocol for the analysis of spinal biomechanics consists of 39 operators which calculate forces and torques in points of the body determined by markers, and angles between them. In order to test protocol, both standing and walking of the examinee were recorded.

Analysis of spinal biomechanics using the designed protocol shows anomalies in movement performances and possible spinal deformities which can be caused by repeating the movements on daily basis. Designed protocol for analysis of spinal biomechanics enables detection of deformities and anomalies at an early stage, and thus increases chances of recovery.

Key words: biomechanics, spine, analysis, protocol

1. Uvod

U Hrvatskoj od bolesti kralješnice boluje svaka deseta osoba te se zbog njih svake godine obavi čak tri milijuna hospitalizacija, što Hrvatsku smješta u sam europski vrh po oboljenju koje drastično smanjuje radnu sposobnost i kvalitetu života. Na kralješnicu se utječe svakodnevno, bez obzira radi li se o hodanju, sjedenju, ležanju, trčanju...

Križobolja je najpoznatiji među akutnim bolovima u leđima. Uzroci su iskliznuli međukralješnički disk koji pritišće korijen živca, ili pogrešno opterećenje diskova i kralješaka. Kronični bolovi u leđima rezultat su pogrešnog opterećenja cjelokupne kralješnice i zbog toga prenapetog leđnog mišićnog sustava, a glavni uzrok su preslabi leđni i trbušni mišići zbog nedovoljnog gibanja. Bolove u leđima pojačava i psihički stres. Problem je taj što se samo u 10 % slučajeva može rendgenski dokazati neka specifična bol u leđima, a 90 % pacijenata pobolijeva od nespecifičnih bolova u leđima čiji se uzroci mogu otkriti tek opsežnim pretragama.

Iako kralješnica ima karakterističan oblik i strukturu, razlikuje se od osobe do osobe. Kako bi se što lakše pronašli uzroci bolova u kralješnici i eventualne deformacije, potrebno je proučiti kako pojedine kretnje utječu na njezinu strukturu te odrediti granične vrijednosti opterećenja koje dovode do bolova i deformacija.

Kada je riječ o načinima liječenja bolesti vezanih za kralježnicu, oni se kreću od najjednostavnijeg poput promjene životnih navika, preko fizikalne terapije, kiropraktike i ostalih neoperativnih metoda, do operacijskih zahvata među kojima se razlikuju oni jednostavniji, te vrlo komplicirani i zahtjevni. Međutim, postoje i slučajevi koji zahtijevaju drugačiji pristup liječenju, jer zglobovi kralješnice postaju do te mjere uništeni da čovjeku ozbiljno otežavaju kretanje, rad i sam život. Takvi pacijenti moraju biti podvrgnuti složenijem, rekonstrukcijskom obliku kirurgije kralješnice koji pokatkad zahtijeva iznimno složene zahvate, a izvodi ih relativno malo liječnika.

1.1. Anatomija – glavne komponente kralješnice

Kralješnica je središnji aksijalni organ koji, promatran u sagitalnoj ravnini, izgleda kao stup u obliku dvostrukog slova S. Obavlja statičke i dinamičke zadatke te omogućava tijelu stabilnu, ali mobilnu strukturu. Opterećena je težinom glave, trupa i gornjih ekstremiteta te štiti leđnu moždinu i korijene živaca leđne moždine.

Kralješnički stup čine 33-34 kralješka, podijeljenih u 5 segmenata. Njihova struktura je različita ovisno o segmentu kralješnice, što se odražava na specifične statičke i funkcionalne zahtjeve. Svim kralješcima zajednički je vanjski koštani sloj (lat. compacta) i unutarnji

spužvasti sloj (lat. spongiosa). Svojim oblikom omogućavaju vezivanje mišića što predstavlja važan element mobilnosti. Složeni zajedno u kralješnički stup, otvori svih kralješaka tvore kralješnički kanal kroz koji prolazi leđna moždina, dok živci leđne moždine s krvnim žilama izlaze kroz međukralješničke otvore.

Kralješnički stup čine:

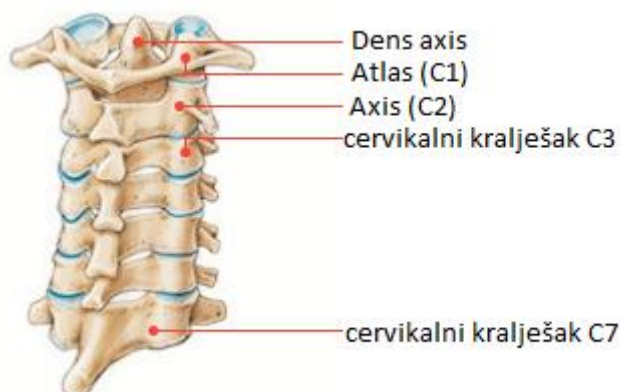
- Vratna (cervikalna) kralješnica – 7 kralješaka
- Prsna (torakalna) kralješnica – 12 kralješaka
- Slabinska (lumbalna) kralješnica – 5 kralješaka
- Križna (sakralna) kralješnica – 5 kralješaka
- Trtična kralješnica – 4-5 kralješaka



Slika 1.1. Segmenti kralješnice [2]

1.1.1. Vratna (cervikalna) kralješnica

Vratna kralješnica je dio kralješničkog stupa s najvećim stupnjem mobilnosti te ima mogućnost brzog pokreta duž cijele duljine. Sastoji se od 7 kralješaka (C1-C7), od kojih prva dva Atlas (hrv. nosač) C1 i Axis (hrv. obrtač) C2 imaju drugačiji oblik od ostalih što im omogućava podupiranje glave i njezinu mobilnost.



Slika 1.2. Vratni (cervikalni) dio kralješnice [2]

Atlas je prvi vratni kralješak (C1), kružnog je oblika i direktno nosi težinu glave. Sastoji se od dva lateralna elementa spojena prednjim i stražnjim lukovima. Spojen je s occipitalnom kosti lubanje preko zglobnih nastavaka, tvoreći atlantooccipitalni zglob koji omogućava kretanje glave naprijed, natrag i u strane za nekoliko stupnjeva.



Slika 1.3. Atlas (C1) [2]

Posebna struktura drugog vratnog kralješka (Axis) zajedno s njegovim nastavkom u obliku zuba (lat. Dens axis), koji se produžuje u otvor prvog kralješka, omogućava prijelaz između Atlasa i ostalih kralješaka vratne kralješnice. Dens axis je pozicioniran čvrstim ligamentom kako ne bi oštetio leđnu moždinu. Četiri atlantoaksijalna zglobova između Atlasa i Axisa omogućuju rotaciju glave pri čemu se Atlas rotira ekscentrično oko središnje točke Axisa.



Slika 1.4. Axis (C2) [2]

Atlas, Axis i occipitalna kost lubanje povezani su složenim sustavom ligamenata koji u kombinaciji s atlantoaksijalnim zglobovima i pričvršćenim mišićima omogućuju zavidnu mobilnost glave.

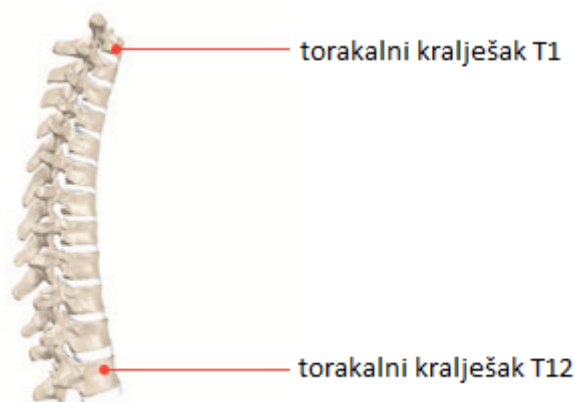
Vratni kralješci imaju veliki otvor (lat. foramen) trokutastog oblika kroz koju prolazi leđna moždina, a manji su od prsnih i slabinskih kralješaka. Kralješnički nastavci su horizontalni. Posebne značajke vratnih kralješaka su otvori u poprečnim nastavcima kroz koje se protežu kralješničke arterije koje se granaju od subklavialne arterije, duž obje strane vratne kralješnice i opskrbljuju mozak krvlju.



Slika 1.5. Vratni (cervikalni) kralješak (C3-C7) [2]

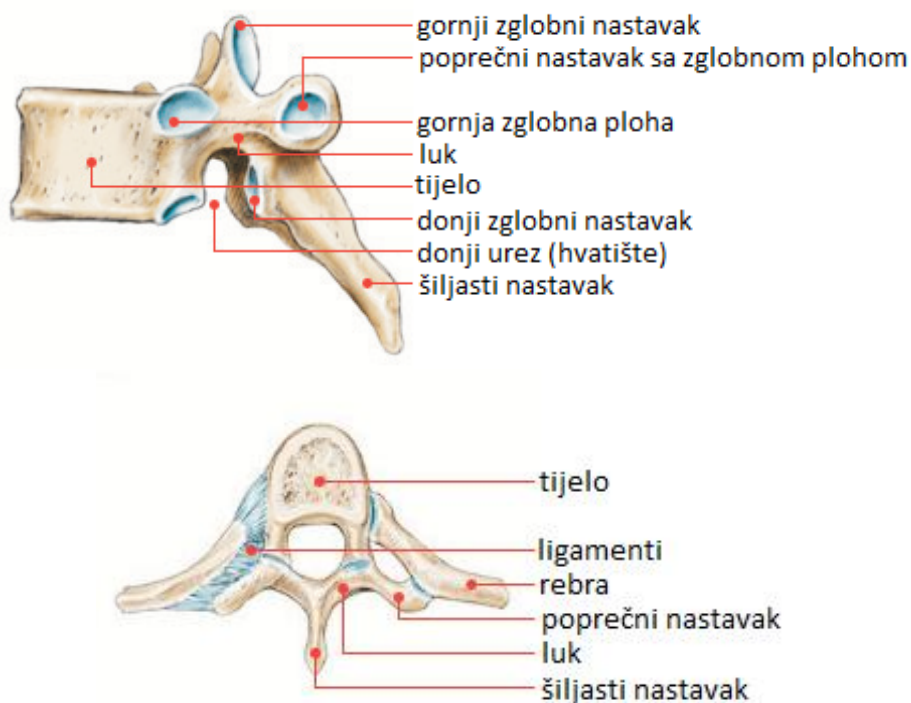
1.1.2. Prsna (torakalna) kralješnica

Prsni dio kralješnice čini 12 kralješaka (T1-T12) poredanih na način da tvore karakteristično izbočenje - torakalnu kifoza.



Slika 1.6. Prsni (torakalni) dio kralješnice [2]

Prsni kralješci veći su od vratnih, imaju relativno teško tijelo s ravnim zaobljenim trostranim (eng. wedge) oblikom koji je niži s prednje strane. Debeli, trostrani nastavci usmjereni su prema natrag i stupnjevito prema dolje. Kralješnički otvor je okruglog oblika i manji je nego kod vratnih kralješaka. Svaki poprečni nastavak ima tri zglobne veze pomoću kojih je spojen s rebrima. Te veze su pozicionirane i zaštićene čvrstim zglobnim čahurama i ligamentima. Kralješci zajedno s pripadajućim rebrima i prsnom kosti (lat. sternum) štite unutarnje organe. Prsni dio kralješnice ima najmanji stupanj mobilnosti.



Slika 1.7. Prsni (torakalni) kralješak (T1-T12) – pogled sa strane i odozgo [2]

1.1.3. Slabinska (lumbalna) kralješnica

Slabinski dio kralješnice čini 5 kralješaka (L1-L5). Njihova su tijela veća od svih ostalih skupina kralješaka, obzirom da slabinska kralješnica nosi velik dio težine tijela.



Slika 1.8. Slabinski (lumbalni) dio kralješnice [2]

Imaju oblik sličan prsnim kralješcima, iako je prednja strana deblja. Poprečni nastavci su debeli, usmjereni horizontalno i mnogo manji nego kod prsnih. Kralješnički otvor je trokutastog oblika i manji je nego kod prsnih i vratnih. Posebna struktura slabinskih kralješaka osigurava visok stupanj mobilnosti za istežanje trupa u slabinskom dijelu.

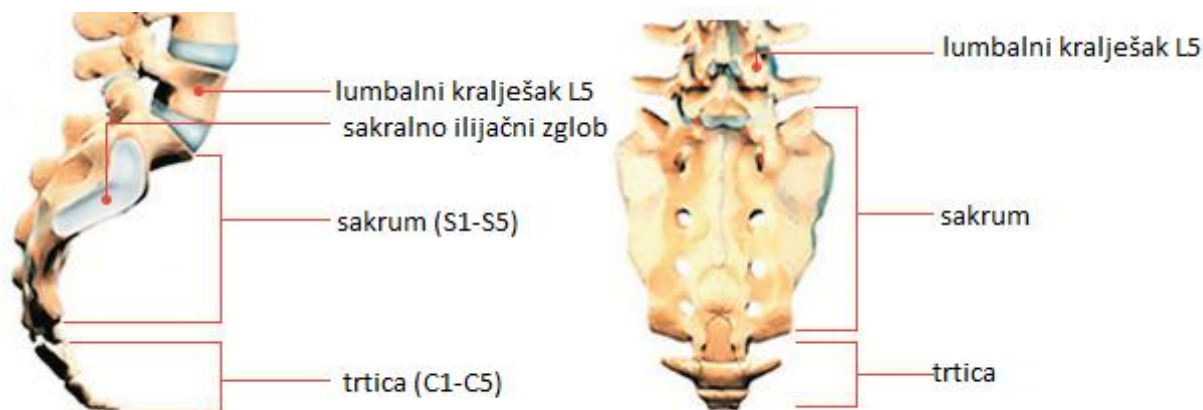


Slika 1.9. Slabinski (lumbalni) kralješak (L1-L5) [2]

1.1.4. Križni (sakralni) i trtični dio kralješnice

Križni dio kralješnice sastoji se od 5 kralješaka srašćenih zajedno tako da tvore trokutastu plohu (sakrum) koja se prema kraju sužava. Ima četiri otvora koji omogućavaju prolaz za živce i krvne žile, a gornja baza plohe služi kao sjedište slabinskog kralješka L5. Zglobni nastavci smješteni su sa strane gdje se spajaju s ilijačnim kostima (lat. ilium) zdjelice. Taj spoj je na mjestu osiguran jakim ligamentima i dozvoljava ograničenu mobilnost.

Trtica se sastoji od 4 ili 5 sraslih kralješaka i osigurava hvatište za ligamente i mišiće zdjelice. Zdjelica, donji lumbalni kralješci i sakralna kost podložni su značajnim statičkim opterećenjima zbog čega su te koštane strukture spojene složenim sustavom debelih ligamenata.



Slika 1.10. Sakralno trtični dio kralješnice [2]

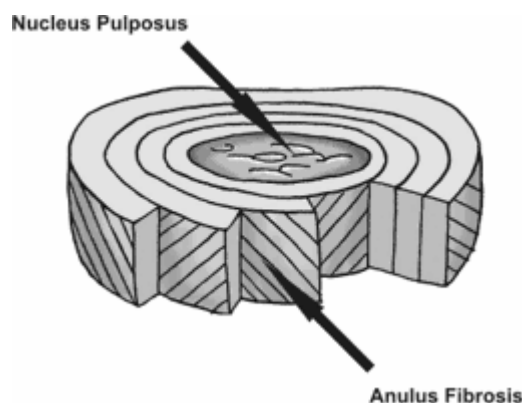
1.1.5. Međukralješnički disk

Tijela kralješaka su spojena, ali i odvojena međukralješničkim diskovima. Disk je morfološki strukturiran tako da bude predodređen ozljedi u pogledu velikog opterećenja. Sastoji se od vlaknastog prstena (lat. annulus fibrosus) i želatinaste jezgre (lat. nucleus pulposus) i čvrsto je spojen s rubnim plohama tijela kralješaka duž vanjske površine vlaknastog prstena. Rubne plohe su sastavljene od hijalinske (eng. hyaline) hrskavice. Vaskularni kanali unutar tijela kralješaka smješteni su tako da se pružaju direktno na rubnih ploham, predstavljajući glavni nutritivni izvor za zrele stanice diska. Neke krvne žile nalaze se blizu periferije vlaknastog prstena, ali ne ulaze u nju. Rubne plohe s godinama kalcificiraju što sprječava opskrbu nutrijentima i pridonosi progresivnoj degeneraciji diska tijekom odrastanja. Ozljede i degeneracija diska smanjuju funkcionalnost prenošenja sila kroz hidrostatski tlak, što smanjuje sposobnost stanica diska da održe izvanstaničnu matricu. Takve promjene su praćene povećanom sposobnošću osjeta i prijenosa boli.

Želatinasta jezgra smještena je posterocentralno u disku i u lumbalnom dijelu ispunjava 30 % do 50 % poprečnog presjeka diska. Normalno se sastoji od gotovo isključivo kolagenskih vlakana tipa 2 u vodenastom gelu bogatom proteoglikanima (eng. proteoglycans). Udio vode u normalnoj jezgri ljudskog slabinskog diska snižava se od 90 % tijekom prve godine života do 74 % od 80. godine nadalje.

Vlaknasti prsten sastoji se od koncentričnih slojeva snopova kolagenskih vlakana. Vanjski sloj čine vlakna kolagena tipa 1, a unutarnji mješavina od 40 % vlakana kolagena tipa 1 i 60 % vlakana kolagena tipa 2. Tijekom starenja kolagen tipa 1 počinje zamjenjivati kolagen tipa

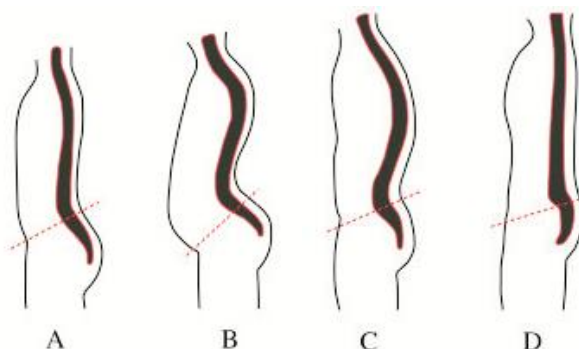
2, a javlja se i kolagen tipa 3. Orijentacija vlakana razlikuje se ovisno o sloju, a obično je zakrenuta za 30° u odnosu na horizontalnu ravninu, dok je kut između vlakana u dva susjedna sloja 120° . Debljina slojeva je približno konstantna u posteriornim (50 do 200 μm) i lateralnim dijelovima (100 do 300 μm), a unutarnji slojevi anteriornog dijela (200 do 300 μm) su deblji od vanjskih (50 do 100 μm).



Slika 1.11. Građa međuralješničkog diska [5]

1.2. Deformacije kralješnice

Deformacije kralješnice predstavljaju ne samo estetski nego i funkcionalni problem. Na stupanj deformacije utječe prvenstveno položaj zdjelice koji ovisi o nizu prirodnih i stečenih čimbenika. Općenito, deformacije kralješničkog stupa dijele se na one u sagitalnoj (kifoza i lordoza) i u frontalnoj (skolioza) ravnini. Iako su kifoza i lordoza karakteristične krivulje koje kralješnici daju oblik dvostrukog slova S, prevelika odstupanja nepovoljno utječu na strukturu i funkciju kralješnice. Navedene deformacije nerijetko se javljaju zajedno jer odstupanja u jednom pravcu povlače sa sobom i odstupanja u drugom pravcu.



Slika 1.12. Deformacije kralješnice [2]

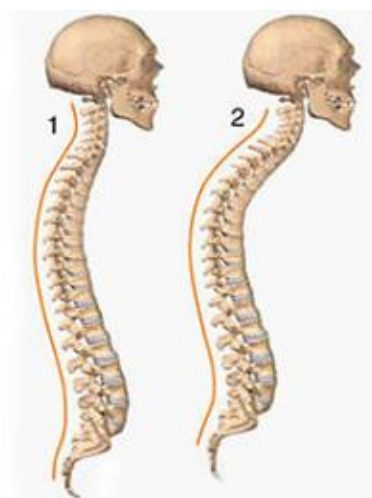
A – normalno držanje, B – lordotično držanje s karakterističnim jače izraženom torakalnom kifozom i lumbalnom lordozom, C – kifotično držanje s izraženim izbočenjem (grbom), D – držanje s ravnim leđima pri čemu su prirodna kifoza i lordoza izravnane.

1.2.1. Kifoza

Kifoza je iskrivljenost kralješničkog stupa u sagitalnoj ravnini s izbočenjem (konveksitetom) prema natrag, a razvija se s početkom hodanja praćena nagibom zdjelice. Normalna kralješnica pokazuje fiziološku kifožu torakalnog dijela od 20° do 30° s vrhom zakrivljenosti u predjelu kralješka T5. U predjelu kifotične krivulje tijelo kralješka na prednjoj strani ima visinu nižu do 5° što uzrokuje fiziološku uklinjenost.

Torakalna kifoza smatra se deformacijom kada je izbočenje torakalnog dijela kralješnice veće od 45° pri čemu dolazi do uklinjenja kralješaka, suženja međukralješničkog prostora i nepravilne kralješničke pokrovne ploče, a zakrivljenost se može protezati sve do lumbalnog dijela. Kifoza se može pojaviti u bilo kojem periodu života, a može biti prirođena ili stečena. Ukoliko ne postoje promjene na kralješcima, kifoza je funkcionalna i može se korigirati.

Glavne karakteristike kifoze su glava savijena prema naprijed (ispred vertikalne linije), ramena pomaknuta naprijed i pojačana pogrbljenost, uvučen prsni koš, lopatice istaknute i odvojene od kralježnice te mlitav i ispučen trbuh.



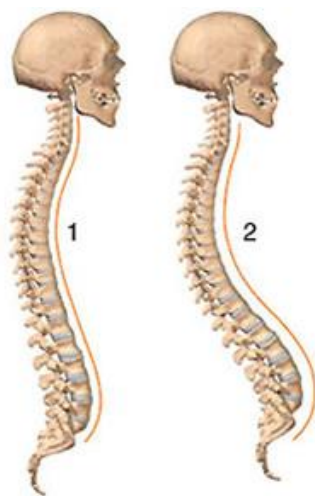
Slika 1.13. 1. Normalni oblik kralješnice, 2. Kralješnica s izraženom kifozom [6]

1.2.2. Lordoza

Lordoza je iskrivljenost kralješničkog stupa u sagitalnoj ravnini s udubljenjem prema natrag. Normalna kralješnica pokazuje fiziološku lordozu vratnog dijela (cervikalna lordoza), koja se razvija s podizanjem glave, u iznosu od 3 do 4 cm i lordozu slabinskog dijela (lumbalna lordoza), koja se razvija s početkom hodanja, a iznosi 4 do 5 cm.

Veličina lordoze mjeri se u stupnjevima po Cobb metodi i mjerenjem udaljenosti udubljenja lumbalnog dijela od vertikalne linije „potiljak - pod“. Lordoza može biti prirođena ili stečena, a ukoliko nema promjena na kralješcima može se korigirati.

Glavne karakteristike lordoze su glava zabačena unatrag od linije vertikalne, prsni koš je ravan ili ispupčen, fiziološka lordotična krivina je naglašena, zdjelica je pomaknuta naprijed i dolje, a koljena su u pojačanoj ekstenziji.



Slika 1.14. 1. Normalni oblik kralješnice, 2. Kralješnica s izraženom lordozom [6]

1.2.3. Skolioza

Skolioza je kompleksna trodimenzionalna deformacija kralješnice koja uzrokuje strukturalne promjene u sve tri ravnine i može se pojaviti u svim segmentima kralješnice. Promatrano u frontalnoj ravnini, skolioza se očituje kao (djelomično) fiksno lateralno odstupanje kralješničkog stupa s deformacijom kralješničkih tijela. U transverzalnoj ravnini, rotacija kralješaka oko njihove osi promatra se u odnosu na vrh skolioze, a u tom dijelu se pojavljuje i torzija kralješničkog stupa. U sagitalnoj ravnini, fiziološke krivulje (kifoza i lordoza) su promijenjene, s povećanjem ili smanjenjem zaobljenja, ovisno o tipu skolioze. Zbog rotacije izbočenje i udubljenje mogu zamijeniti strane. Lateralno odstupanje ne može se u potpunosti kompenzirati. U slučaju progresivnog lateralnog odstupanja, kralješnički segmenti progresivno postaju krući. S morfološkog stajališta, povećano odstupanje tijela kralješaka rezultira strukturalnim promjenama u svim elementima tijela kralješaka.

Vrste skolioze:

- Strukturalna skolioza - pojava deformacije i rotacije tijela kralješaka koje ne mogu biti kompenzirane,
- Funkcionalna skolioza – nije fiksna, najčešće je vidljiva u slučajevima oštećenja držanja (npr. različite duljine nogu)

Glavne karakteristike skolioze su nepravilan red kralješničkih prstenova, različite visine ramena, grba na konveksnoj strani uslijed rotacije kralješaka, udubljenje na konkavnoj strani uslijed rotacijske asimetrije kralješaka, asimetrični trokut struka, nakrivljeno držanje glave, lateralna izbočina trupa, degenerativne promjene u kralješničkim segmentima koji su zahvaćeni, deformacije prsnog koša, smanjena mogućnost kretanja i kvalitete života.

Klasifikacija skolize:

1. Idiopatska skolioza – patološki uzrok pojave nije poznat, obuhvaća 80 do 90 % svih skolioza,
2. Kongenitalna (prirođena) skolioza – vrlo rijetka, uzrokovana prirođenim oštećenjem u embrionalnom razvoju kralješka, zbog težine deformacije često potrebna operacija,
3. Neuromuskulturna skolioza – uzrok su razne neurološke i mišićne bolesti.

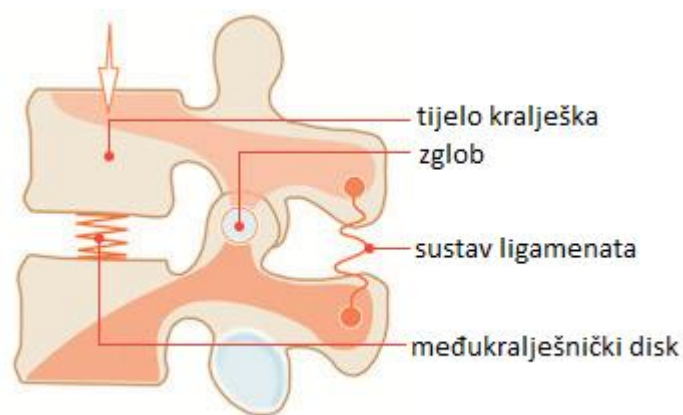


Slika 1.15. Skolioza u frontalnoj i sagitalnoj ravnini [2]

2. Biomehanika i kinematika kralješnice

Ljudsko držanje primarno ovisi o genetski uvjetovanoj baznoj strukturi kralješničkog stupa, a uglavnom se promatra u uspravnom stajaćem položaju. Brojne varijacije su moguće kao rezultat različitih faktora poput razvoja mišića i kosti, sustava ligamenata, tonusa mišića te psiholoških utjecaja. Normalno držanje, gledano u sagitalnoj ravnini, okarakterizirano je kao tipična formacija s dvije različite vrste krivulja (lordoza i kifoza).

Kralješnica može podnijeti aksijalne, lateralne i sagitalne rotacije te aksijalne, lateralne i anteroposterijalne translacije, što znači da ima šest stupnjeva slobode. Najvažnije funkcije kralješnice su apsorpcija, prigušenje te prijenos tlaka i udarnih opterećenja kao i apsorpcija i oslobađanje pokreta. Najmanji funkcionalni element kralješnice naziva se mobilni (dinamički) segment, a sastoji se od dva susjedna kralješka, međukralješničkog diska, uzglobljenih spojeva i sustava ligamenata. Međukralješnički disk je srastao s bazom i gornjim ploham kralješka te prednjim uzdužnim ligamentom, što osigurava stabilnost. Deformabilnost spužvastog središta diska daje mobilnom segmentu dozu elastičnosti i slobode gibanja. Disk i sustav ligamenata su u funkcionalnoj ravnoteži koja se naziva diskoligamentna stabilnost. Unutar ravnina tijela, u mobilnom segmentu postoji 12 trodimenzionalnih smjerova kretanja: vlak i tlak, lateralni pomak (lijevo i desno), sagitalni pomak (naprijed i natrag), savijanje i istežanje, uvijanje (lijevo i desno) te lateralni nagib (lijevo i desno).



Slika 2.1. Mobilni segment prema Junghansu [2]

Gibljivost kralješnice ponajviše ovisi o funkcionalnom stanju međukralješničkog diska s obzirom da je savitljivost između dva kralješka u direktnom odnosu s kvadratom visine diska i u indirektnom odnosu s kvadratom njihovog horizontalnog promjera. Smjerove pokreta u pojedinim segmentima određuju položaji malih zglobova, dok međukralješnički diskovi, u pokretu, imaju ulogu poluzgloba koji dozvoljava samo određeni opseg međusegmentalne gibljivosti. Svako prekomjerno povećanje pokretljivosti mobilnog segmenta, unutar fizičkog opterećenja, upućuje na biomehaničku nestabilnost. Iako je kralješnica mnogozglobni

mehanički sustav, stabilnost je dobivena uravnoteženim odnosom oprečnih naprezanja jezgri u smjeru pritiska na tijelo kralješka i elastične otpornosti ligamenata koji ih približava. Na taj način omogućeno je ograničeno interkorporalno gibanje teoretski u svim smjerovima, ali predodređeno položajem malih zglobova.

Obzirom na gibljivost, vratna kralješnica se dijeli na tzv. gornju vratnu kralješnicu, koju čine prva dva kralješka s dijelom lubanjske baze oko velikog otvora s ispupčenjem (C0), i donju vratnu kralješnicu, koju čine vratni kralješci od C3 do C7. Dva dijela vratne kralješnice razlikuju se u složenosti biomehanike i složenosti kretnji. Oko 50 % vratne rotacije izvršava se u gornjem dijelu, a pojedinačno najjače izražena rotacija glave je u spoju između drugog i trećeg vratnog kralješka. Oko 80 % kretnji fleksija/ekstenzija vrata odvija se u donjem segmentu kao zbroj pojedinačnih kretnji između trećeg i sedmog vratnog kralješka, iako se ante i retrofleksija glave u najvećoj pojedinačnoj kretnji odvija u atlantooccipitalnom zglobo. Prijelaz prema prsnoj kralješnici, u dinamičkom smislu, predstavlja jasno ograničavanje kretnji, a time i mjesto povećane ranjivosti.

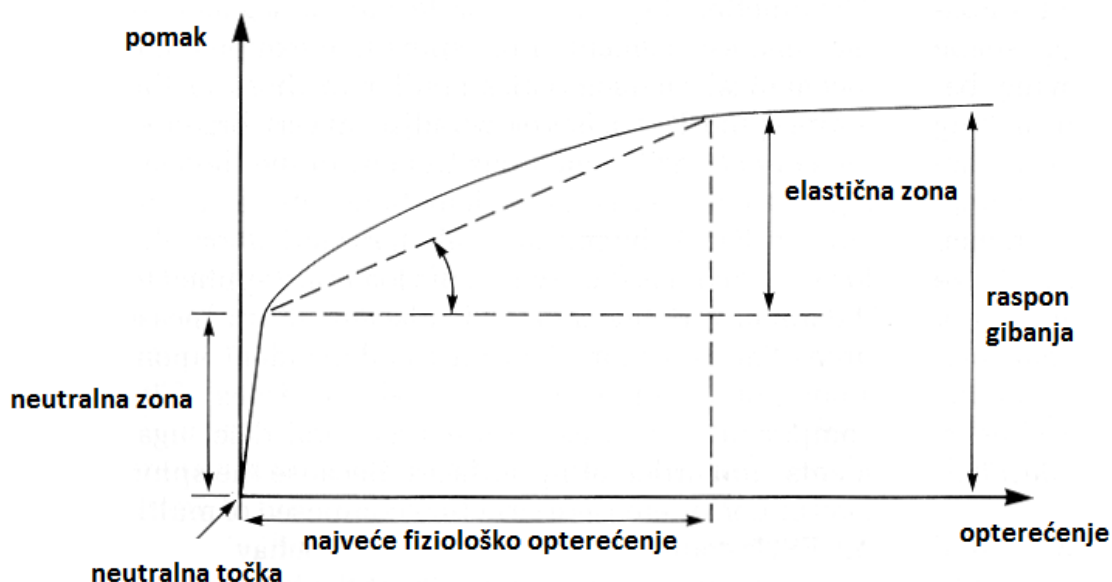
Prsna kralješnica s prvih 10 rebara tvori čvrstu anatomsku konstrukciju (prsni koš), dok preostala dva rebra zajedno s zadnja dva prsna kralješka te prvim i drugim slabinskim kralješkom tvore torakolumbalni spoj gdje je moguća veća mobilnost, a time i ranjivost.

Slabinska kralješnica ima u cjelini maksimalnu pokretljivost od 60° do 70° u savijanju i do 30° u istezanju, dok je lateralni nagib moguć do 30°. Stupanj rotacije svakog pojedinog mobilnog segmenta slabinske kralješnice je ograničen na samo 2°. Donji dio slabinske kralješnice, a pogotovo prema sakralnoj, smatra se slabom točkom u statičkoj kralješnici, obzirom da kralješak L5 pokazuje tendenciju pomaka prema naprijed (spondilolisteza) kao odgovor na promjene lumbalosakralnog kuta.

Međukralješnički zglobovi funkcioniraju kao centar rotacije između kralješničkih tijela, kao prednjeg dijela kralješničkog stupa, i stražnjeg dijela kojeg čine poprečni kralješnički pršljenovi, sustav ligamenata i duboki leđni mišići. S godinama taj osjetljivi sustav ravnoteže kralješnice može razviti opasne nestabilnosti koje mogu rezultirati raznim degenerativnim bolestima kralješnice.

Kinematika proučava gibanje tijela, a obrasci gibanja kralješnice su složeni. Normalna gibanja su okarakterizirana zajedničkim parametrima duž dijelova kralješnice. Ako se optereti silom ili momentom, funkcionalna jedinica ili veći dio kralješnice, prvo se pomakne iz neutralnog položaja do položaja u kojem se pojavi dovoljno velik otpor tom opterećenju. Početni slobodni dio gibanja naziva se neutralna zona (NZ). Postojanje neutralne zone omogućava kralješnici da podnese relativno velika gibanja s vrlo malim radom mišića. Povećanje neutralne zone može ukazivati na abnormalnu strukturalnu promjenu i može biti razlog za brigu. Nakon neutralne zone dolazi dio očvršćivanja koji se naziva elastična zona (EZ). Pomak pri najvećem opterećenju ili na granici gibanja naziva se raspon gibanja (RG). Ta tri

parametra su učinkovita u opisivanju složenog odnosa nelinearnog opterećenja i pomaka. Može se primijetiti da je taj nelinearan odnos sličan gotovo svakom biološkom tkivu, te da kralješnica kao struktura pokazuje viskoelastična svojstva kao posljedica viskoelastične prirode svojih konstituenata.



Slika 2.2. Prikaz tipične reakcije opterećenje - pomak funkcionalnog dijela kralješnice [5]

Fleksija se odnosi na nagib prema naprijed oko osi okomite na sagitalnu ravninu, a ekstenzija na nagib prema natrag oko te osi. Zajedno, fleksija i ekstenzija smatraju se sagitalnim nagibom. Lateralni nagib odnosi se na nagib u lijevu ili desnu stranu, dok se aksijalna torzija odnosi na okretanje glave, primjerice, u lijevu ili desnu stranu.

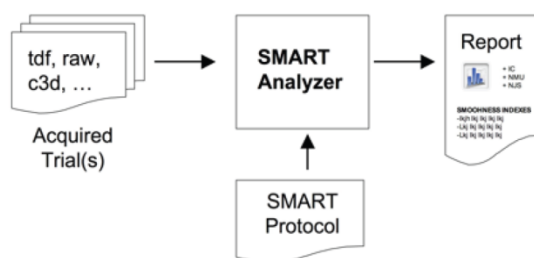
Obrazac gibanja odnosi se na putanju pomaka koju kralješak prati pod opterećenjem. Kada obrasci gibanja odstupaju od „normalnog“, to može ukazivati na abnormalnosti kralješnice. Termin spajanje, odnosi se na gibanje oko ili duž sporedne osi narinutog opterećenja, a promjene kod spojenih gibanja također mogu biti indikator kliničke nestabilnosti koja se mora liječiti. Trenutna os rotacije je os oko koje se kralješak rotira u nekoj jedinici vremena. Kod normalnih funkcionalnih jedinica kralješnice, trenutna os za svaku vrstu rotacije nalazi se na relativno malom području negdje unutar jedinice kralješnice. Kod abnormalnih kralješničkih funkcionalnih jedinica, npr. kod jedinica s degenerativnim diskom, smještaj trenutnih osi može se pomaknuti izvan fizičkog prostora jedinice.

3. Metoda rada i oprema

Biomehanička analiza tijela provodi se u svrhu proučavanja opterećenja na pojedinim segmentima tijela, te eventualnih odstupanja u odnosu na „normalno“ stanje. Analiza se sastoji od snimanja pokreta (prikupljanja podataka) i obrade prikupljenih podataka.

Snimanje pokreta je tehnika digitalnog snimanja korištenjem sustava za eksperimentalno praćenje pokreta ljudskog tijela BTS Elite. Prikupljanje podataka omogućeno je infracrvenim optoelektroničkim sustavom, a analiza se temelji na detekciji i trodimenzionalnoj rekonstrukciji pasivnih markera postavljenih na određenim mjestima. Kvaliteta rekonstrukcije položaja markera u prostoru ovisi o usklađenosti nekoliko faktora: tehnici obrade podataka korištenoj za prepoznavanje markera, geometrijskoj kvaliteti markera, tehnologiji telekamera i kalibriranju radnog volumena. Konstantnim poboljšavanjem opreme omogućeno je praćenje bilo kojeg pokreta. BTS raspolaže brojnim programskim paketima koji omogućavaju obradu podataka već postojećih protokola (Davisov ili Saflov) kao i izradu novih, ovisno o području interesa. Prije razvoja BTS SMART Analyzer programskog paketa, podaci prikupljeni snimanjem pokreta prema nekom od postojećih protokola obrađivani su korištenjem alternativnih aplikacija, a izrada proizvoljnog protokola za biomehaničku analizu pokreta nije bila moguća.

BTS SMART Analyzer je programski paket za biomehaničku analizu pokreta s trodimenzionalnim kinematičkim podacima, snimkama i analognim podacima s platforme sila, elektromiografa ili drugih uređaja. Fleksibilnost i cjelovitost čine ga idealnom tehnologijom za analizu pokreta u različitim područjima primjene uključujući neurofiziologiju, protetiku, robotiku, veterinu, fonetiku i sport. Biomehanička funkcija ovog programa je izrada računalne sheme koja generira sve podatke potrebne za potpunu analizu motoričkih kretnji, a izgled sučelja čini korištenje BTS SMART Analyzera vrlo jednostavnim. Osim što je moguće izraditi protokol za proizvoljnu raspodjelu markera, BTS SMART Analyzer sadrži bazu podataka s međunarodno poznatim protokolima za analizu (Davis, Helen Hayes, Rab, Lamb, Oxford foot model...) te protokolima za analizu sportskih pokreta kao što su analiza zamaha, skoka... BTS SMART Analyzer može kao ulazni podatak uzeti protokol i varijabilni broj prikupljenih ispitivanja. Iako bi potencijalno mogao raditi na bilo kojem sustavu, nužno je markere označiti prema modelu napravljenom koristeći BTS SmartTracker ili BTS Tracker kako bi se dobivena ispitivanja obradila. Izlazni podaci dobiveni obradom u BTS SMART Analyzeru mogu se prikazati u obliku tablica i grafova, te pohraniti u raznim formatima kako bi se mogli otvoriti pomoću drugih programskih paketa kao npr. Microsoft Office Word, Excel, Powerpoint, Visio...

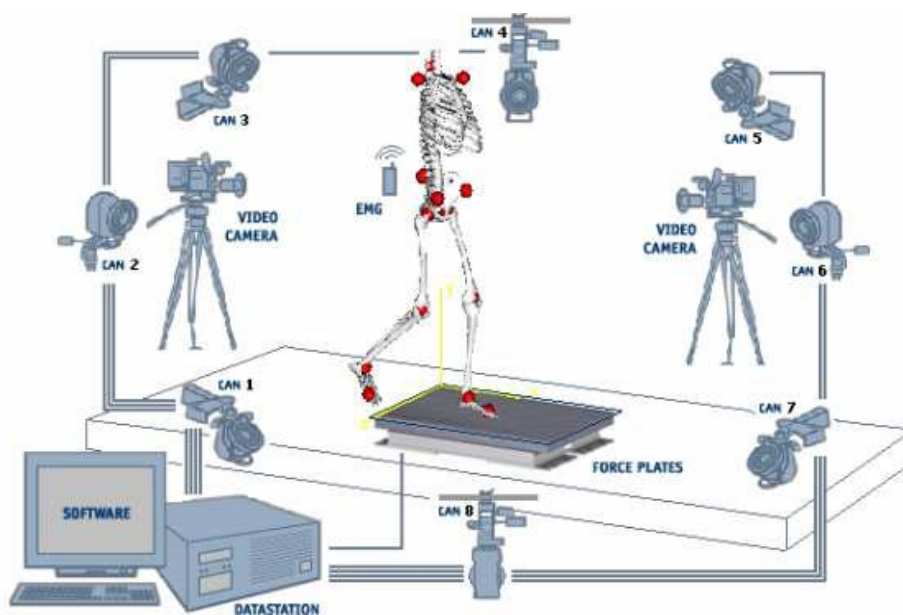


Slika 3.1. Simbolički prikaz obrade podataka u BTS SMART Analyzeru

3.1. Mjerni sustav

Biomehanička analiza provedena je u laboratoriju za biomehaniku ljudskog kretanja, smještenom u prostoru Sportsko dijagnostičkog centra Kineziološkog fakulteta u Zagrebu. Laboratorij je opremljen sustavom ELITE 2002 koji uključuje 8 kamera frekvencije 100 Hz i 8-kanalnu telemetrijsku površinsku elektromiografiju spojenih na računalo, te dvije video kamere frekvencije 30 Hz. Sustav talijanske proizvodnje, tvrtke Bioengineering Technology & Systems (BTS) iz Milana, nabavljen je sredstvima Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

Prostorni pomaci ljudskog tijela automatski se registriraju brzinom 100 puta u sekundi, uz prostornu točnost mjerenja reda veličine nekoliko mm. Radni prostor iznosi 6 x 2 x 2 m, što je za potrebe lokomotorne aktivnosti kao što je hod sasvim dovoljno. Dodatno se koristi i platforma za mjerenje sile reakcije podloge švicarske proizvodnje tvrtke Kistler stavljena na raspolaganje susretljivošću zagrebačkog Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Laboratorij je opremljen s osam kamera za snimanje pokreta, računalom s BTS Engineering programskim paketima te platformom sila.



Slika 3.2. Shematski prikaz mjernog sustava [9]

Kao izlazne veličine sustava dobiju se krivulje u funkciji vremena pojedinih varijabli kao što su: kutovi u pojedinim zglobovima (u tri dimenzije), momenti u pojedinim zglobovima, sila i moment, reakcija podloge, koordinate središta pritiska tijekom oslanjanja o podlogu, te višekanalni površinski EMG signali.

3.2. Opis postupka

Postupak izrade protokola za analizu biomehanike kretanja provodi se prema sljedećim koracima:

1. Kalibracija sustava
2. Uzimanje antropomjera ispitanika
3. Postavljanje pasivnih markera
4. Snimanje pokreta
5. Označavanje markera
6. Izrada protokola
7. Obrada podataka i analiza rezultata

3.2.1. Kalibracija sustava

Prije samog snimanja, potrebno je kalibrirati radni prostor koji pokrivaju kamere. Svi predmeti koji reflektiraju svjetlost moraju biti uklonjeni jer će ih sustav prepoznati kao markere. Da bi se mogao odrediti nepoznati položaj markera u prostoru na temelju snimki kamera poznatih pozicija, potrebno je prethodno utvrditi (snimiti) niz kontrolnih točaka (markera) čije su međusobne udaljenosti u prostoru točno poznate i koji su raspoređeni unutar prostora u kojem će biti izvršeno snimanje. Kalibracija prostora odnosi se na definiranje koordinata prostora mjerenja, tj. koordinatnog sustava s koordinatnim okvirom s devet statičkih markera. Nakon kalibracije prostora vrši se kalibracija platforme sila koja se izvodi pomoću koordinatnog okvira sa šest statičkih markera.



Slika 3.3. Kalibracija sustava

3.2.2. Uzimanje antropomjera ispitanika

Prije snimanja pokreta potrebno je odrediti antropomjere ispitanika i sastav tjelesne mase ispitanika. Određuju se visina, masa, širina oba koljena, širina oba skočna zgloba, širina zdjelice te duljina obje noge od kuka do skočnog zgloba. Antropomjere se potrebne da bi se temeljem izmjerenih prostornih položaja praćenih oznaka mogli utvrditi prostorni položaji zamišljenih središta zglobova.



Slika 3.4. Uređaj za analizu sastava tjelesne mase

Osim antropomjera, ispitanik ispunjava upitnik o zdravstvenom stanju u kojem navodi zanimanje, aktivnosti kojima se bavi (profesionalno ili rekreativno), eventualne ozljede, operacije koje utječu na način kretanja. Ti podaci su važni za elaboraciju rezultata dobivenih biomehaničkom analizom budući da životne navike utječu na način kretanja pojedinca.

3.2.3. Postavljanje pasivnih markera

Markeri su male, bijele, reflektirajuće oznake sfernog oblika raznih dimenzija. Pri snimanju pokreta osvijetljeni su bljeskom infracrvene svjetlosti čiji se izvor nalazi u kameri, te se odbljesak s markera detektira na senzoru. Okrugli reflektirajući markeri daju jednak intenzitet odbljeska bez obzira na trenutni položaj markera te omogućuju korištenje teoretski neograničenog broja markera uz maksimalnu slobodu kretanja snimane osobe. Marker se postavlja na predviđena mjesta po mogućnosti izravno na kožu ispitanika. Na mjestima gdje je to moguće pričvršćuju se samoljepljivom trakom, a ako to nije moguće, koriste se gumene trake podesive duljine (primjerice za glavu). Najmanja udaljenost između dva susjedna markera mora biti 3 cm jer se u protivnom markeri zasjenjuju što otežava ili čak onemogućava njihovo kasnije raspoznavanje u označavanju i obradi prikupljenih podataka. Ovisno o dijelu tijela za koji se želi dobiti podatke o opterećenjima te vrsti pokreta koji se analizira, određuje se broj i raspored markera. Nakon što su markeri postavljeni na ispitanika, moguće je snimiti i analizirati bilo koji pokret unutar radnog prostora.



Slika 3.5. Markeri i gumene trake

3.2.4. Snimanje pokreta

Pokret koji se analizira ponavlja više puta kako bi se dobio što prirodniji obrazac kretanja. Za snimanje statičkih položaja kao što je stajanje, dovoljno je zadržati položaj nekoliko sekundi. U slučaju hodanja, potrebno je otprilike 20 ponavljanja. Kod snimanja važnu ulogu ima platforma koja, u trenutku kada ispitanik stane na nju, prikazuje reakciju podloge. Stojeći položaj kao i ostali pokreti kod kojih ispitanik stoji na mjestu (npr. podizanje tereta) snimaju se na platformi.



Slika 3.6. Kamere u laboratoriju za biomehaniku ljudskog kretanja

Hodanje se snima na način da se ispitanik kreće zadanim pravcem unutar radnog prostora, koji je označen žutom trakom na podu. Ispitanik kreće s ruba radnog prostora, prolazi kroz njega i pritom svaki put stane na platformu. Pokret se ponavlja dok se ne dobije određen broj pravilnog kontakta stopala s platformom sa svakom nogom. Pravilnim kontaktom smatra se kontakt cijelim stopalom samo jedne noge na površini platforme.



Slika 3.7. Radni prostor i platforma laboratorija za biomehaniku ljudskog kretanja



Slika 3.8. Snimanje hodanja

3.2.5. Označavanje markera

Video zapis snimljenog pokreta otvara se u BTS Bioengineering Elite programskom paketu. U njemu se markeri prikazuju kao bijele točke u trodimenzionalnom radnom prostoru. Sljedeći korak je izrada novog žičanog modela na način da se markeri prikažu kao što su postavljeni na ispitaniku i međusobno se povežu. Zatim se markeri u video zapisu označavaju prema oznakama na žičanom modelu. Označavanje markera omogućava da snimljene trodimenzionalne koordinate, koje su unutar registrirane datoteke pokreta, budu prepoznate i povezane s pripadajućom realnom točkom na objektu i time omoguće daljnje korake. Na ovaj način potrebno je obraditi svaki snimljeni pokret koji se želi dalje analizirati. Svi pokreti koji su snimljeni s istim brojem i rasporedom markera, označavaju se prema istom modelu pa nije potrebno svaki put ponovo raditi novi žičani model.

Zbog osjetljivosti kamera i njihovog preklapanja u radnom prostoru, može se dogoditi da dvije kamere različito percipiraju koordinatu pojedinog markera što može rezultirati nestankom markera na snimci ili povezivanjem markera s krivom oznakom. Bitno je provjeriti da su u svakom dijelu snimljenog pokreta svi markeri pravilno označeni kako ne bi došlo do gubljenja snimljenih podataka. Ukoliko se u nekom trenutku marker izgubi ili nije označen, prilikom obrade podataka u BTS SMART Analyzeru, za taj se period neće ispisivati vrijednost. Nakon označavanja svih markera, snimka pokreta se sprema u .RAW formatu koji sadrži 3D koordinate markera i otvara se u BTS SMART Analyzeru kako bi se obradili prikupljeni podaci prema napisanom protokolu.

Video zapis s označenim markerima sprema se i u .RIC formatu (rekonstruirane 3D koordinate). Taj zapis se otvara pomoću Biomech programskog paketa i konvertira u .C3D format, koji je moguće pokrenuti u BTS SMART Analyzeru, a omogućava prikaz reakcija podloge s platforme.

3.2.6. Izrada protokola

Protokol je niz operatora za obradu podataka koji se izrađuje u BTS SMART Analyzeru. Prvo je potrebno otvoriti snimku pokreta u .RAW formatu obrađenu u BTS Bioengineering Eliteu koja sa sobom povlači markere kao trodimenzionalne točke i reakciju podloge dobivenu na platformi. Protokol može sadržavati izraze za jednodimenzionalne ili trodimenzionalne veličine. U oba slučaja bitno je voditi računa o pravilnom redoslijedu i vrsti varijabli koje se unose u operatore kako bi se zaista dobili traženi rezultati. Jednom kada je protokol napisan, sprema se i može se koristiti na bilo kojem ispitaniku dokle god je broj i raspored markera isti (kao i kod žičanog modela). Ako se promijeni broj ili raspored markera, potrebno je izraditi novi protokol.

3.2.7. Obrada podataka i analiza rezultata

Uvrštavanjem ulaznih podataka u svaki operator, podaci se odmah obrađuju, a izlazni podaci se prikazuju u lijevom dijelu zaslona. Dobivene vrijednosti moguće je prikazati i spremati u obliku tablice ili grafa za svaki trenutak snimljenog pokreta. Vrijednosti trodimenzionalnih veličina ispisuju se za svaku koordinatnu os zasebno što omogućava pregledniju analizu i usporedbu podataka.

4. Izrada protokola za analizu biomehanike kralješnice

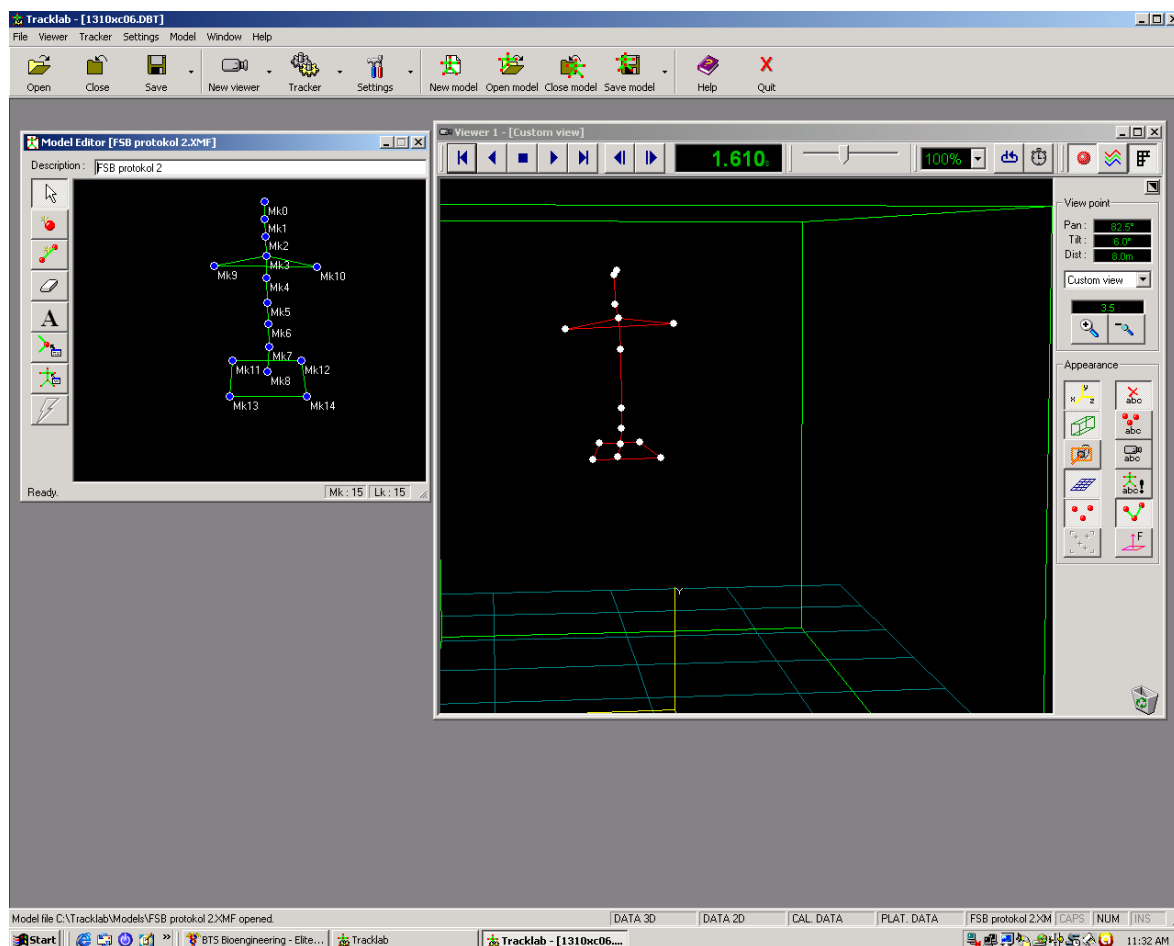
Cilj izrade protokola za analizu biomehanike kralješnice je dobiti uvid u opterećenja kralješnice i njenom položaju pri izvođenju pokreta. Prije samog snimanja pokreta, potrebno je odrediti koji se izlazni podaci žele dobiti nakon primjene protokola, te prema tome odrediti optimalan broj markera i mjesta na koja će biti postavljeni. Pritom treba voditi računa o mogućnostima i ograničenjima mjernog sustava. Također, potrebno je odrediti karakteristične točke koje će opisivati referentnu ravninu u odnosu na koju će se opterećenja i položaj kralješnice promatrati.

Za analizu biomehanike kralješnice, u slučaju koji se opisuje ovim radom, korišteno je 15 markera čiji je raspored prikazan u tablici 4.1. U idealnom slučaju, markeri bi bili postavljeni na svaki kralješak i tako omogućili vrlo preciznu analizu biomehanike kralješnice. Zbog navedenih nedostataka sustava, u pogledu postavljanja markera, odlučeno je da se markeri postave na prvi, zadnji i srednji kralješak svakog segmenta kralješnice (vratni, prsni, slabinski), no marker na četvrtom vratnom kralješku (C4) zbog premale udaljenosti od susjednih markera (C1 i C7) ipak nije bilo moguće postaviti. Osim duž kralješnice, markeri su postavljeni na prednju i stražnju stranu glave, ramena, prednje i stražnje spine (izbočenja zdjelice na prednjoj i stražnjoj strani), te treći križni kralješak (S3). Prednje i stražnje spine čine ravninu zdjelice koja je fiksna, a zajedno s kralješkom S3 predstavljaju referentnu ravninu u odnosu na koju se promatraju pomaci ostalih markera.

Tablica 4.1. Oznake, raspored i naziv markera korištenih za analizu biomehanike kralješnice

Oznaka markera	Mjesto postavljanja	Naziv
Mk0	čelo	prednji glava
Mk1	zatiljak	stražnji glava
Mk2	prvi vratni kralješak	C1
Mk3	sedmi vratni kralješak	C7
Mk4	šesti prsni kralješak	T6
Mk5	prijelaz između prsnog i slabinskog segmenta kralješnice	T12/L1
Mk6	treći slabinski kralješak	L3
Mk7	prijelaz između slabinskog i križnog segmenta kralješnice	L5/S1
Mk8	treći križni kralješak	S3
Mk9	desno rame	desno rame
Mk10	lijevo rame	lijevo rame
Mk11	desna stražnja spina	desna stražnja spina
Mk12	lijeva stražnja spina	lijeva stražnja spina
Mk13	desna prednja spina	desna prednja spina
Mk14	lijeva prednja spina	lijeva prednja spina

Nakon što je određen broj i raspored markera, markeri se postavljaju na ispitanika, te se može započeti sa snimanjem pokreta. Snimljeni pokret otvara se u BTS Bioengineering Elite programskom paketu gdje se markeri označavaju kako bi se prikupljeni podaci mogli dalje obraditi u BTS SMART Analyzeru. Oznake markera dodjeljuju se automatski, redoslijedom kojim su markeri dodavani u izradi žičanog modela, a prikazane su u tablici 4.1.

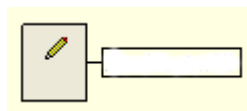


Slika 4.1. Označavanje markera u BTS Bioengineering Elite programskom paketu

Pomoću protokola moguće je odrediti brojne veličine na svakom pojedinom markeru, no korištenje operatora ovisi o opremi kojom se snima pokret i izlaznim podacima koje ona daje. Pri odabiru operatora postoji više mogućnosti zapisa i potrebnih ulaznih podataka, a odabir ovisi o dostupnim podacima dobivenim snimanjem pokreta. Protokol za analizu biomehanike kralježnice, izrađen za opisani model s 15 markera, daje podatke o silama, momentima i kutovima između dijelova tijela označenih markerima.

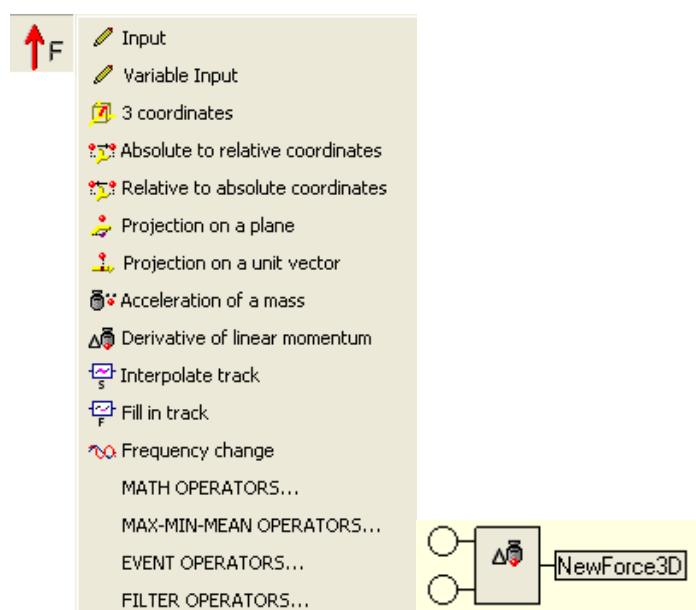
Za izradu protokola korišteni su sljedeći operatori:

- a) Input (Variable) – ovim operatorom definirana je masa ispitanika koja se upisuje svaki put kada se protokol pokrene. U ovom primjeru masa ispitanika je 70 kg.



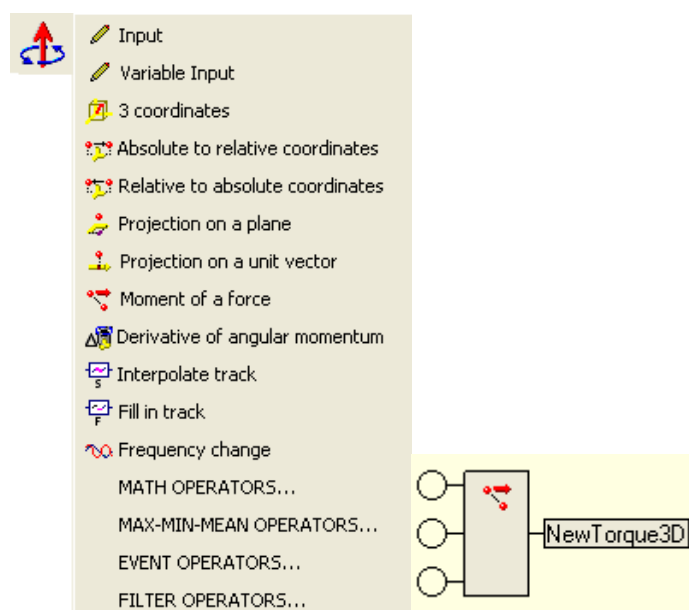
Slika 4.2. Operator za unos varijable [8]

- b) 3D Force (Derivative of linear momentum) – 3D sila (derivacija količine gibanja); ulazni podaci su masa ispitanika i 3D točka (marker)



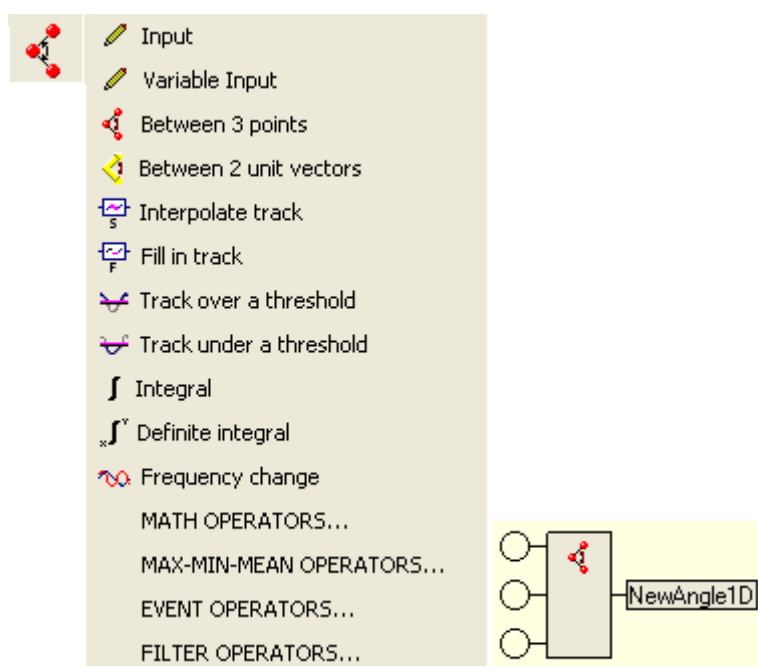
Slika 4.3. Operator 3D sile [8]

- c) 3D Torque (Moment of a force) – 3D moment sile; ulazni podaci su sila, 3D točka rotacije i 3D točka djelovanja



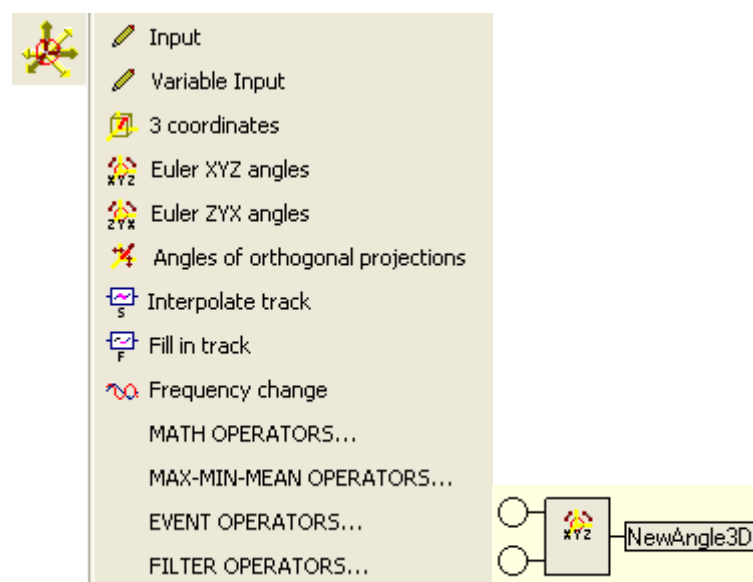
Slika 4.4. Operator 3D momenta [8]

- d) 1D Angle (Between 3 points) – 1D kut između tri 3D točke; ulazni podaci su 3D točke
krakova kuta i vrha kuta



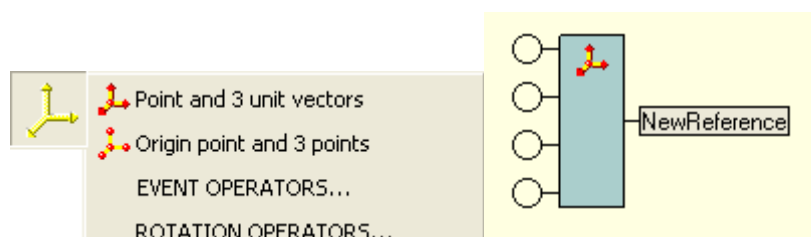
Slika 4.5. Operator 1D kuta [8]

- e) 3D Angle (Euler xyz angles) – Eulerov 3D kut između dva referentna sustava



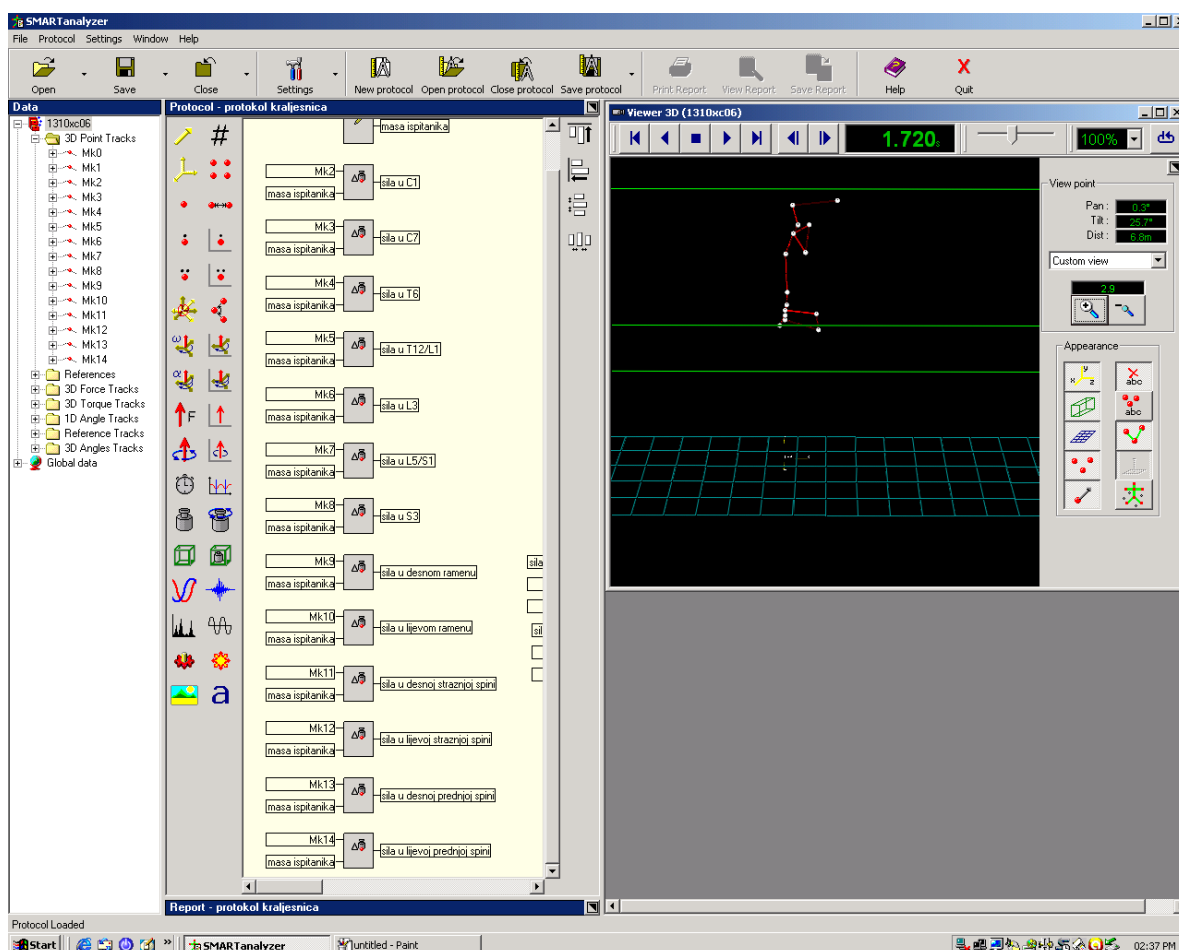
Slika 4.6. Operator 3D kuta [8]

- f) Reference system (Origin point and 3 points) – referentni sustav; ulazni podaci su ishodišna točka i tri točke u čijem smjeru će se pružati osi referentnog sustava

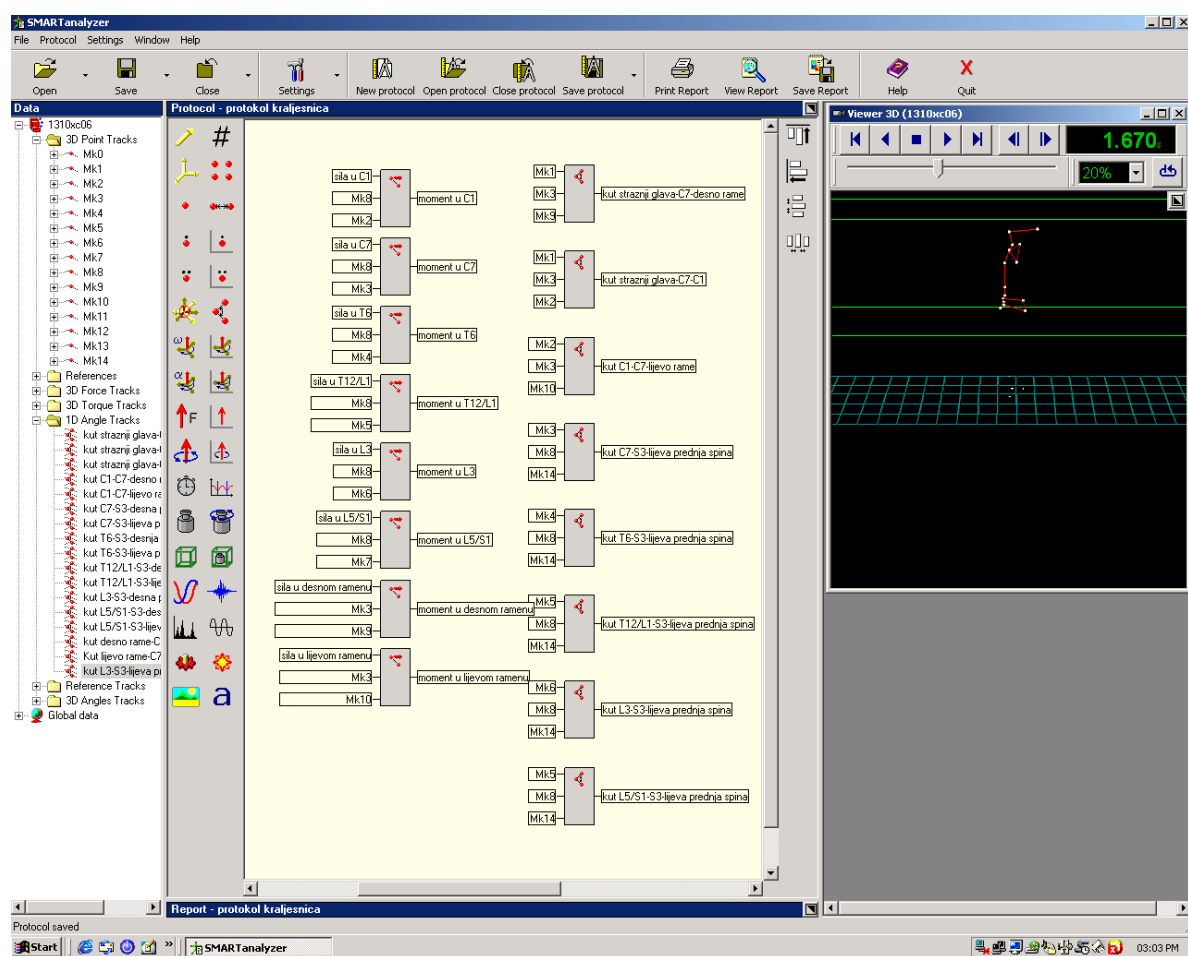


Slika 4.7. Operator referentnog sustava [8]

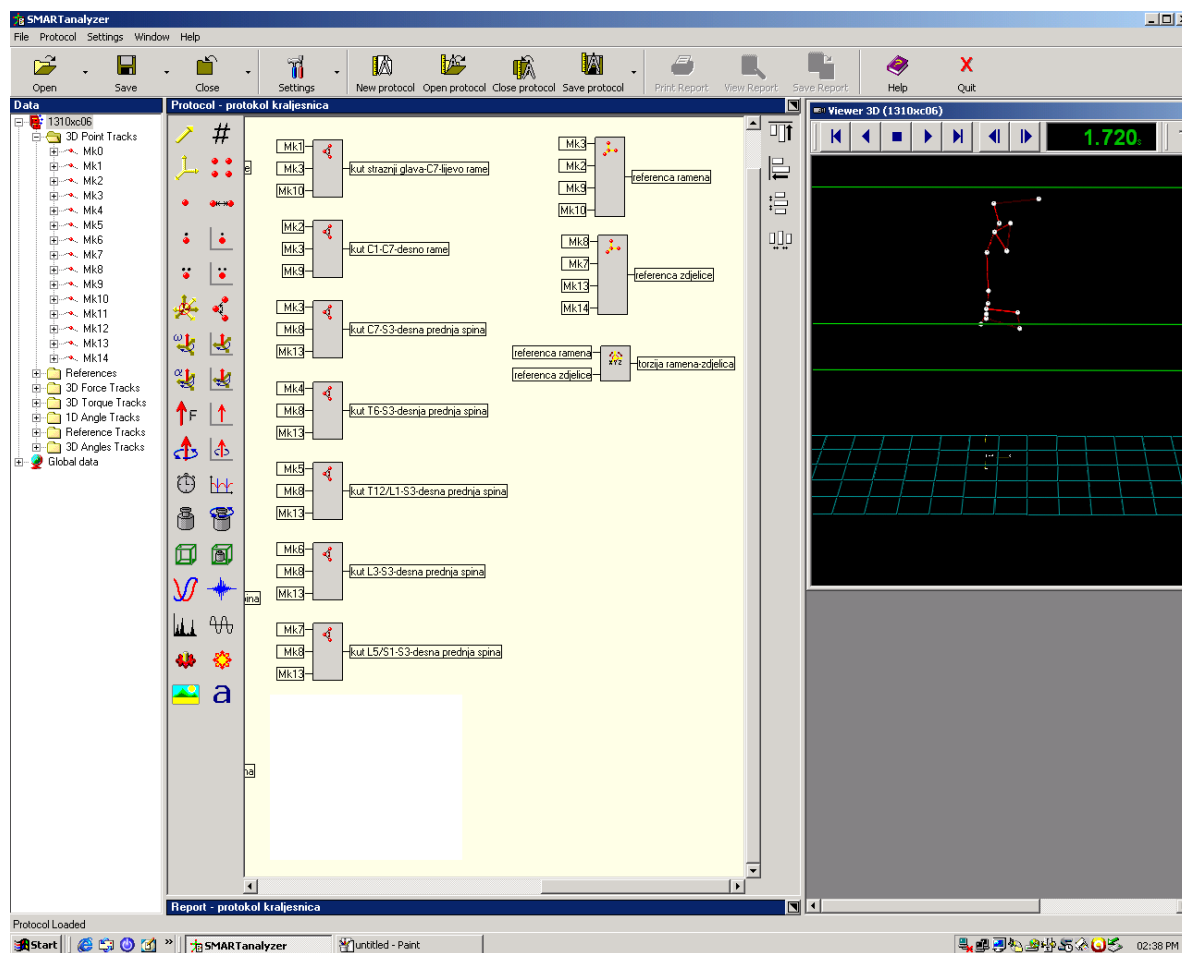
Izrađeni protokol za analizu biomehanike krelješnice sastoji se od 39 operatora. Njihov zapis u BTS SMART Analyzeru prikazan je slikama 4.8., 4.9. i 4.10..



Slika 4.8. Zapis protokola u BTS SMART Analyzeru – sile



Slika 4.9. Zapis protokola u BTS SMART Analyzeru – momenti i kutovi



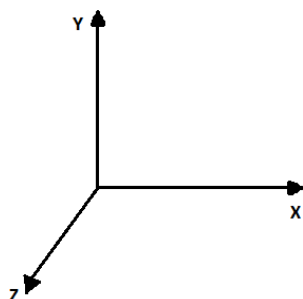
Slika 4.10. Zapis protokola u BTS SMART Analyzeru – kutovi i torzija

Pokretanjem izrađenog protokola, dobiju se sljedeće vrijednosti:

- Sila u prvom vratnom kralješku C1
- Sila u sedmom vratnom kralješku C7
- Sila u šestom prsnom kralješku T6
- Sila na prijelazu između prsnog i slabinskog dijela kralješnice T12/L1
- Sila u trećem slabinskom kralješku L3
- Sila na prijelazu između slabinskog i križnog dijela kralješnice L5/S1
- Sila u trećem križnom kralješku S3
- Sila u desnom ramenu
- Sila u lijevom ramenu
- Sila u desnoj stražnjoj spini
- Sila u lijevoj stražnjoj spini
- Sila u desnoj prednjoj spini
- Sila u lijevoj prednjoj spini
- Moment u prvom vratnom kralješku C1 oko S3

- Moment u sedmom vratnom kralješku C7 oko S3
- Moment u šestom prsnom kralješku T6 oko S3
- Moment na prijelazu između prsnog i slabinskog dijela kralješnice T12/L1 oko S3
- Moment u trećem slabinskom kralješku L3 oko S3
- Moment na prijelazu između slabinskog i križnog dijela kralješnice L5/S1 oko S3
- Moment u desnom ramenu oko C7
- Moment u lijevom ramenu oko C7
- Kut između markera na zatiljku, C7 i desnog ramena
- Kut između markera na zatiljku, C7 i lijevog ramena
- Kut između markera na zatiljku, C7 i C1
- Kut između C1, C7 i desnog ramena
- Kut između C1, C7 i lijevog ramena
- Kut između C7, S3 i desne prednje spine
- Kut između C7, S3 i lijeve prednje spine
- Kut između T6, S3 i desne prednje spine
- Kut između T6, S3 i lijeve prednje spine
- Kut između prijelaza T12/L1, S3 i desne prednje spine
- Kut između prijelaza T12/L1, S3 i lijeve prednje spine
- Kut između L3, S3 i desne prednje spine
- Kut između L3, S3 i lijeve prednje spine
- Kut između prijelaza L5/S1, S3 i desne prednje spine
- Kut između prijelaza L5/S1, S3 i lijeve prednje spine
- 3D kut između reference ramena i reference zdjelice koji prikazuje torziju kralješnice (referenca ramena ima ishodište u C7, a osi se pružaju u smjerovima C1, lijevog i desnog ramena; referenca zdjelice ima ishodište u S3, a osi se pružaju u smjerovima L5/S1, lijeve i desne prednje spine)

Koordinatni sustav radnog prostora prikazan je na slici 4.11. i smješten je u uglu platforme. Sve dobivene vrijednosti promatraju se u odnosu na taj koordinatni sustav.



Slika 4.11. Koordinatni sustav

Kako bi se testirao, izrađeni protokol primijenjen je za analizu hoda i uspravnog stava ispitanika.

5. Rezultati analize biomehanike kralješnice

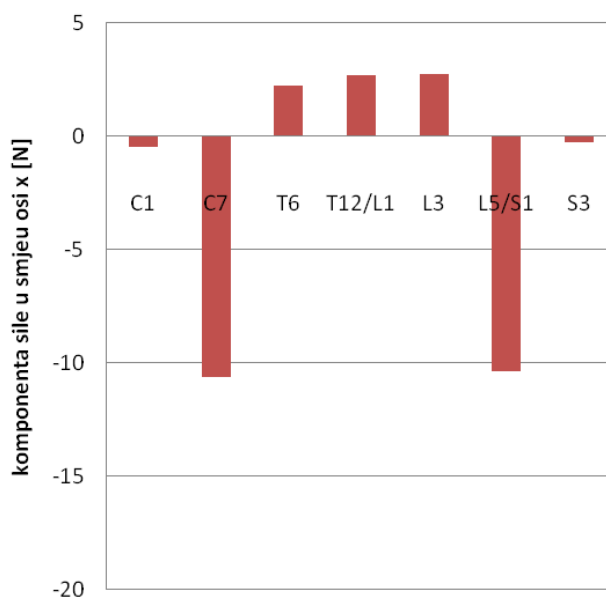
Vrijednosti dobivene obradom prikupljenih podataka prema izrađenom protokolu za analizu biomehanike kralješnice, mogu ukazati na nepravilnosti u držanju ili obavljanju promatranih pokreta, te opterećenja na mjestima gdje su postavljeni markeri. Snimanja i analize pokreta najčešće se provode prije i nakon operativnih zahvata ili terapije, te se rezultati uspoređuju kako bi se vidio njihov učinak.

5.1. Analiza stojećeg položaja

Rezultati dobiveni primjenom protokola za biomehaniku kralješnice na uspravni stav (stajanje) ukazuju na opterećenje u označenim segmentima kralješnice i njihov položaj u odnosu na referentnu ravninu koja je određena prednjim spinama i kralješkom S3.

Kako bi se odredio dio kralješnice koji je najviše opterećen, potrebno je usporediti dobivene vrijednosti za svaki marker postavljen duž kralješnice u istom trenutku, za svaku koordinatnu os zasebno. Kod iznosa pojedinih veličina, na samom početku i kraju uočava se veliki skok vrijednosti, što je posljedica preosjetljivosti sustava. Budući da video zapis traje 10,5 s, kao realni dio promatra se period od 0,5 do 10 s. Za usporedbu opterećenja odabrana je peta sekunda video zapisa.

Sila u kralješcima:

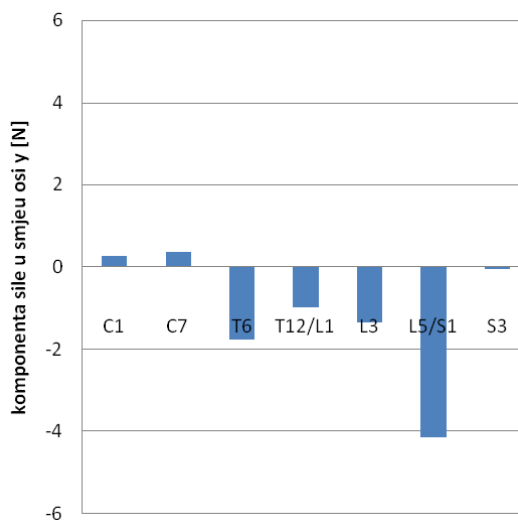


Slika 5.1. X komponenta sile u markerima u 5. sekundi stajanja

Tablica 5.1. Iznos x komponente sile u kralješcima

kralješak	C1	C7	T6	T12/L1	L3	L5/S1	S3
sila [N]	-0,492	-10,638	2,235	2,683	2,738	-10,399	-0,243

U smjeru osi x, koja se poklapa sa sagitalnom ravninom tijela, najviše su opterećeni kralješak C7 (-10,638 N) i prijelaz između slabinskog i križnog dijela segmenta kralješnice L5/S1 (-10,399 N). Komponenta sile na oba dijela kralješnice je negativna što znači da je usmjerena u negativnom smjeru osi x, što bi za ovaj slučaj značilo prema natrag. Najmanje opterećen je kralješak S3 (-0,243 N).

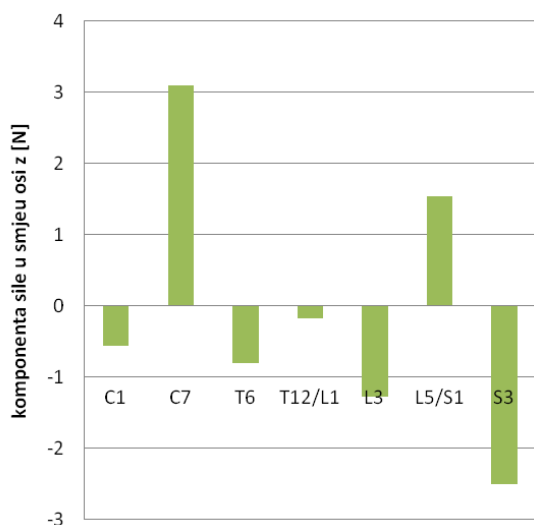


Slika 5.2. Y komponenta sile u markerima u 5. sekundi stajanja

Tablica 5.2. Iznos y komponente sile u kralješcima

kralješak	C1	C7	T6	T12/L1	L3	L5/S1	S3
sila [N]	-0,281	0,375	-1,752	-0,989	-1,357	-4,129	-0,57

U smjeru osi y, najviše je opterećen prijelaz između slabinskog i križnog segmenta kralješnice L5/S1 i iznosi -4,129 N i djeluje prema dolje, a najmanje kralješak S3 gdje komponenta sile iznosi -0,57 N.



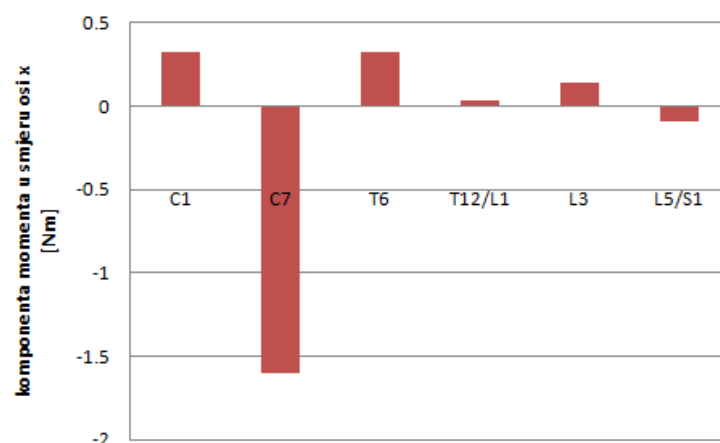
Slika 5.3. Z komponenta sile u markerima u 5. sekundi stajanja

Tablica 5.3. Iznos z komponente sile u kralješcima

kralješak	C1	C7	T6	T12/L1	L3	L5/S1	S3
sila [N]	-0,576	3,096	-0,809	-0,177	-1,288	1,534	-2,517

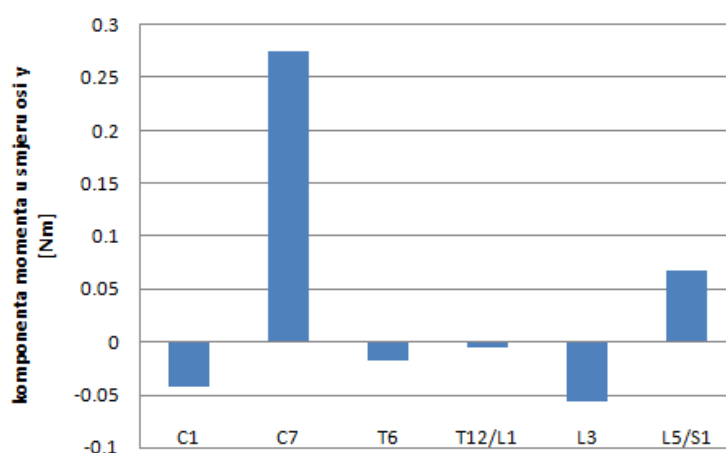
U smjeru osi z, najviše je opterećen kralješak C7 s 3,096 N, a najmanje prijelaz između prsnog i slabinskog segmenta T12/L1 gdje komponenta sile iznosi -0,177 N.

Moment u kralješcima:

**Slika 5.4. X komponenta momenta u 5. sekundi stajanja****Tablica 5.4. Iznos x komponente momenta u kralješcima**

kralješak	C1	C7	T6	T12/L1	L3	L5/S1
moment [Nm]	0,324	-1,601	0,324	0,033	0,141	-0,089

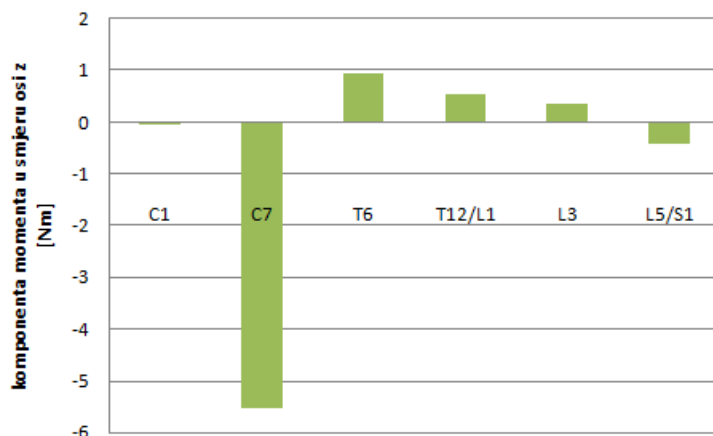
U smjeru osi x, najviše je opterećen kralješak C7 (-1,6 Nm), a najmanje prijelaz između prsne i slabinske kralješnice T12/L1 (0,033 Nm).

**Slika 5.5. Y komponenta momenta u 5. sekundi stajanja**

Tablica 5.5. Iznos y komponente momenta u kralješcima

kralješak	C1	C7	T6	T12/L1	L3	L5/S1
moment [Nm]	-0,043	0,275	-0,018	-0,006	-0,057	0,067

U smjeru osi y, ponovo je najviše opterećen kralješak C7, a najmanje prijelaz između prsne i slabinske kralješnice T12/L1. Međutim, iznosi ovih komponenti su znatno manji od onih u smjeru x osi, pa je tako najveće opterećenje u ovom slučaju 0,27 Nm, a najmanje tek -0,006 Nm.

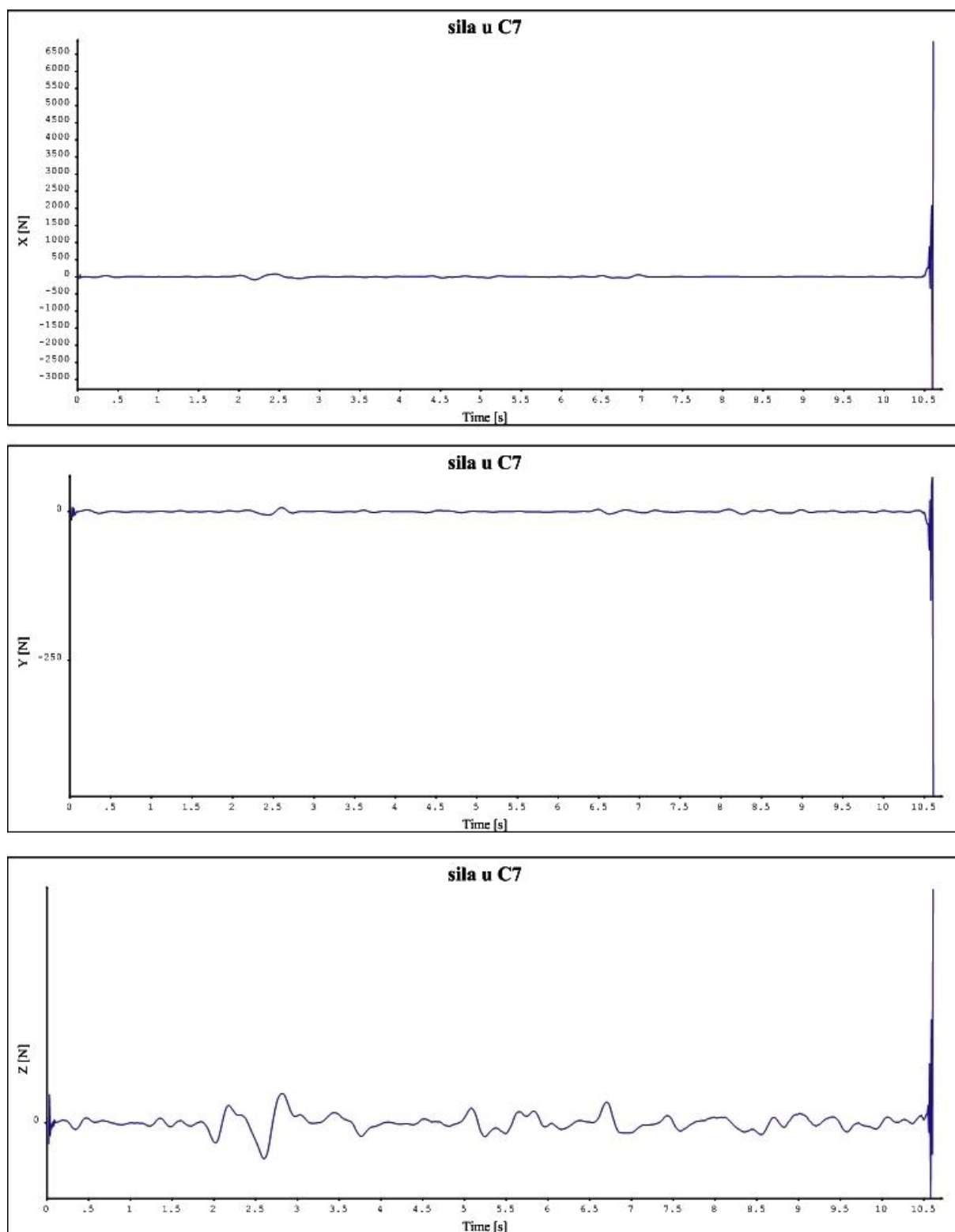
**Slika 5.6. Z komponenta momenta u 5. sekundi stajanja****Tablica 5.6. Iznos z komponente momenta u kralješcima**

kralješak	C1	C7	T6	T12/L1	L3	L5/S1
moment [Nm]	-0,026	-5,535	0,936	0,532	0,359	-0,422

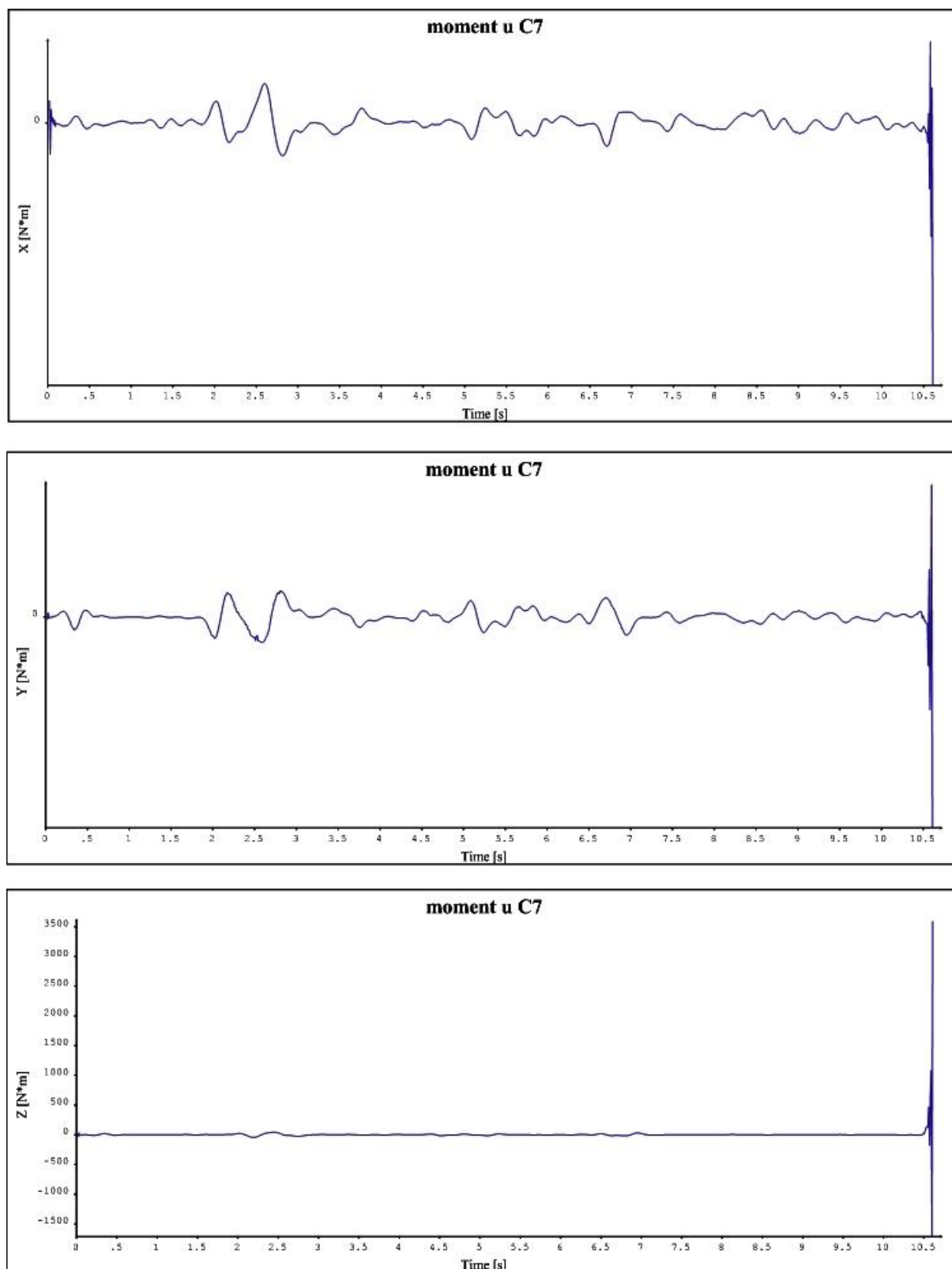
U smjeru osi z, ponovno je najviše opterećen kralješak C7 s -5,535 Nm, a najmanje kralješak C1 s -0,026 Nm.

Sile i momenti koji opterećuju tijelo za vrijeme stajanja su pokazatelji koliko je tijelo opterećeno vlastitom težinom. Svako povećanje uzrokuje veće opterećenje, a primjenom ove analize moguće je se odrediti koliko će se opterećenje povećati ako se masa ispitanika poveća, te na koje će dijelove najviše utjecati. Također, u slučaju kada se operativnim zahvatom sanira ozljeda kralješaka ili međukralješničkih diskova, može se provjeriti uspješnost rasterećenja operiranog segmenta.

Opterećenja na mjestima gdje su postavljeni markeri nisu konstantna u tijeku stajanja, a promjene sile i momenta u kralješku koji je najviše opterećen prikazane su slikama 5.7. i 5.8.

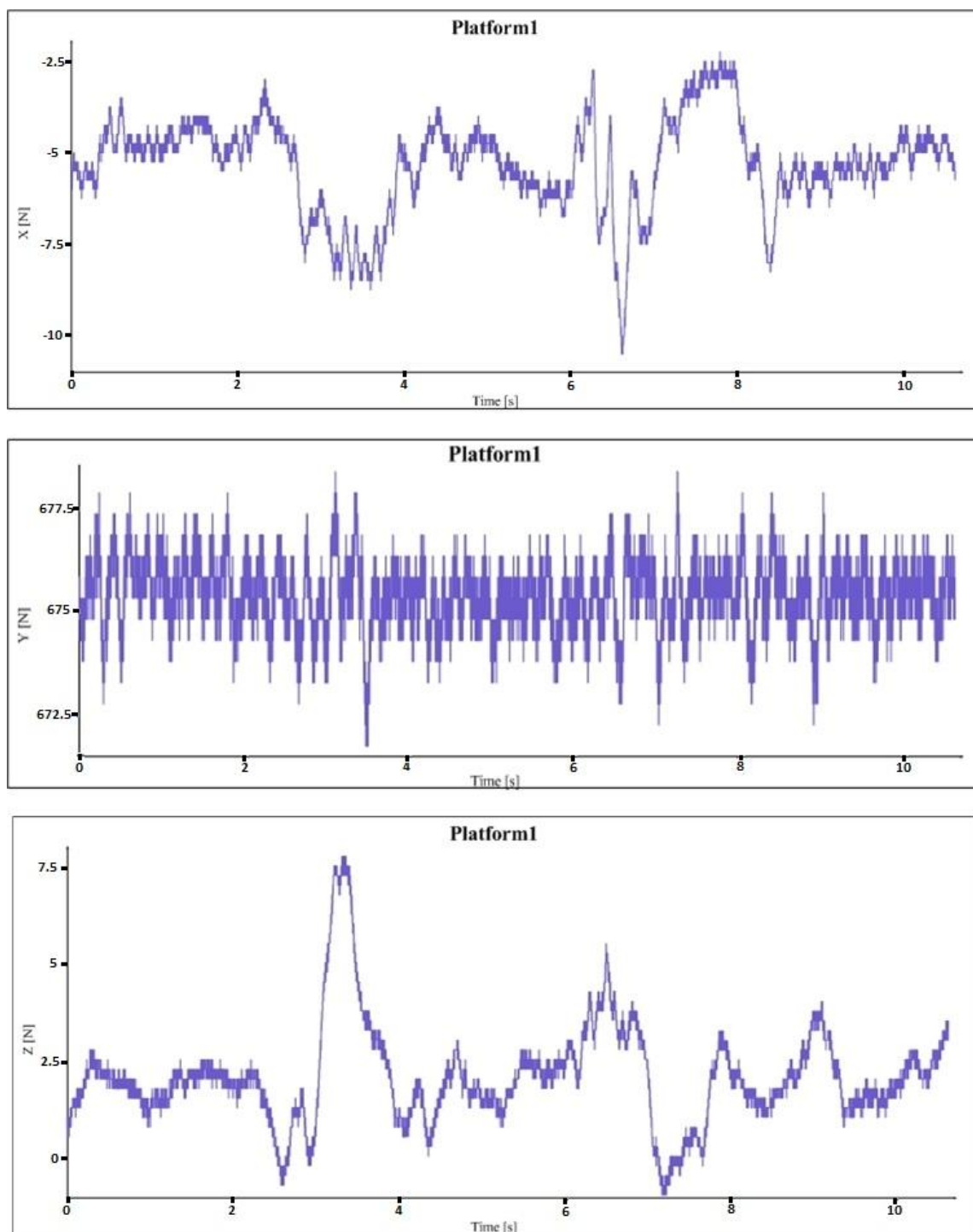


Slika 5.7. Promjena sile u kralješku C7 za vrijeme stajanja



Slika 5.8. Promjena momenta u kralješku C7 za vrijeme stajanja

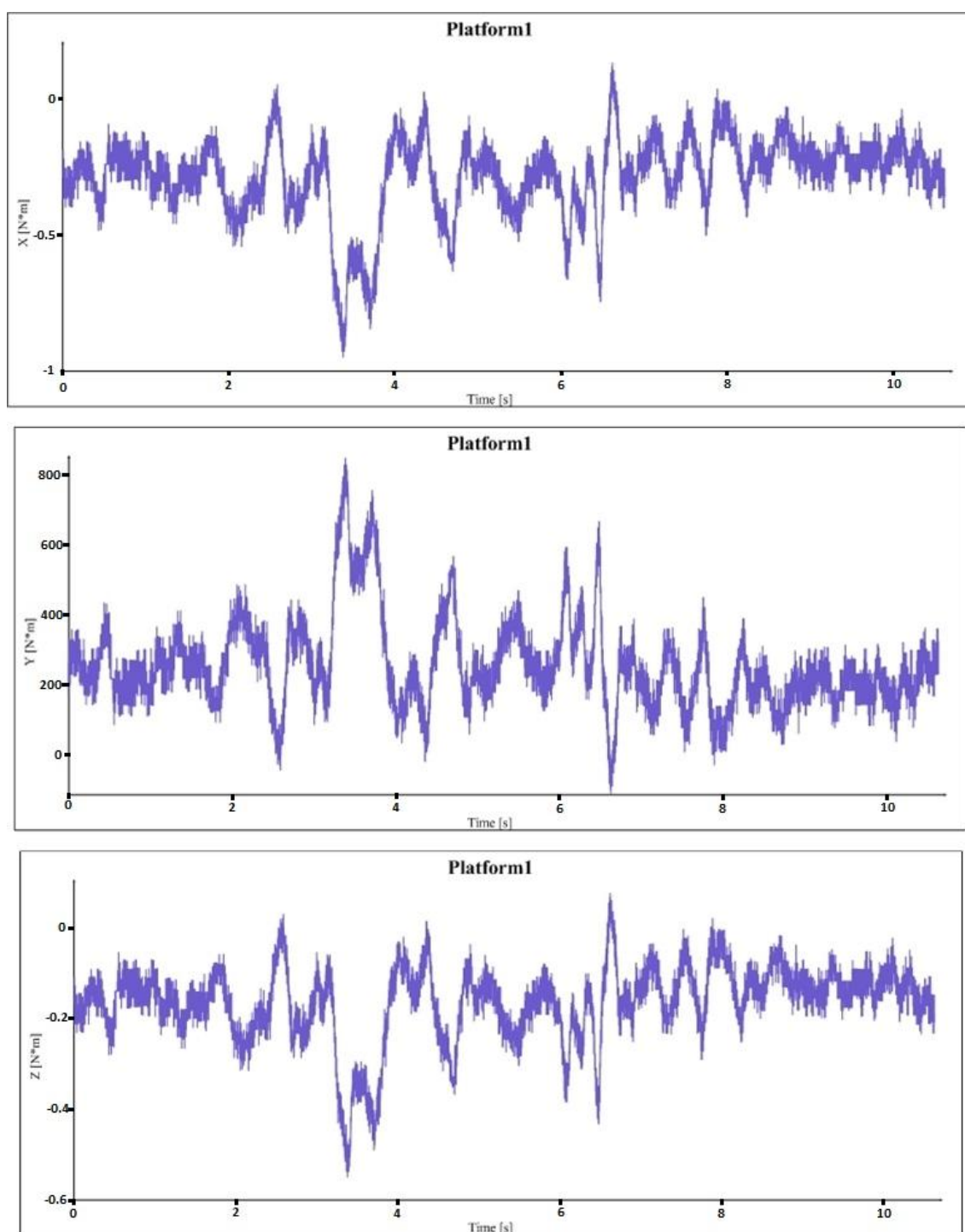
Osim opterećenja na mjestima gdje su postavljeni markeri, zabilježena je i reakcija podloge.



Slika 5.9. Sila platforme za vrijeme stajanja

Iz slike 5.9. vidljivo je da čak i najmanji pokret utječe na promjenu sile platforme. Promjene opterećenja izraženije su na platformi nego u kralješcima. Najveća sila zabilježena je u smjeru vertikalne osi (y) i iznosi 678,4 N, a najveće promjene očituju se u smjeru z osi gdje iznos sile varira od -1 do 7,8 N.

U odnosu na sile, kod momenata platforme vidljivi su veći skokovi (slika 5.10.).



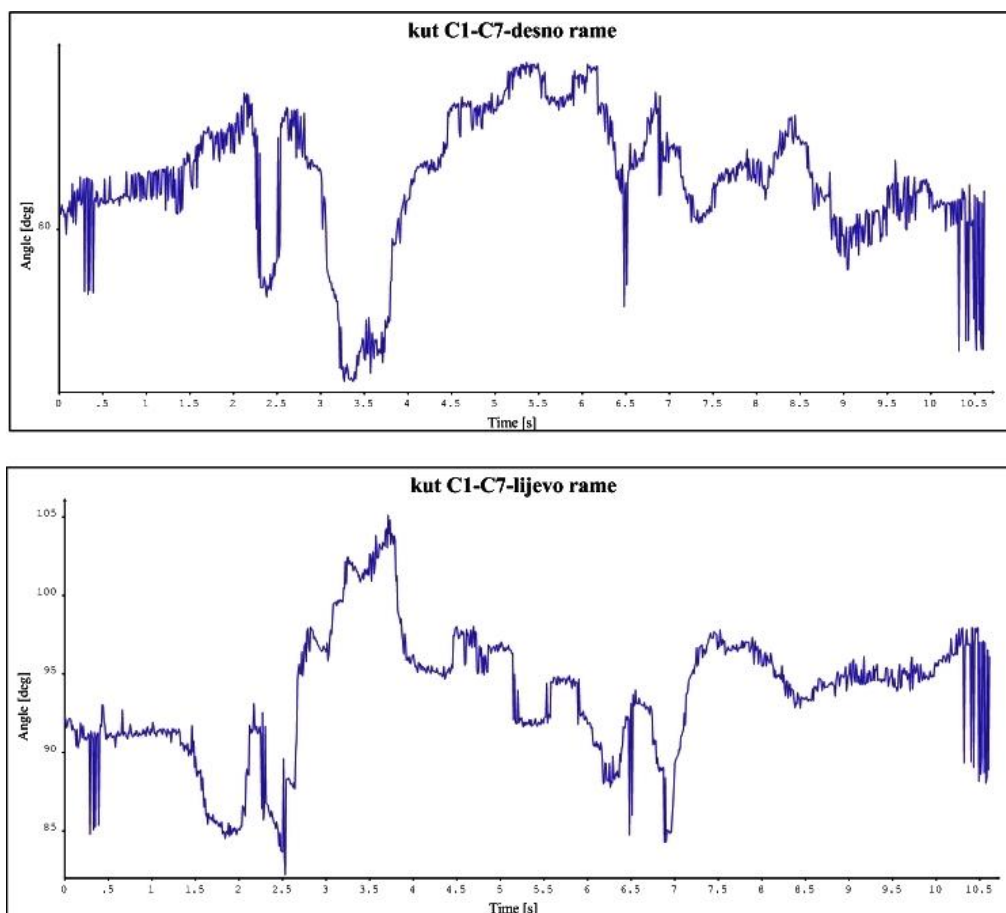
Slika 5.10. Moment platforme za vrijeme stajanja

Najveći moment kao i najveće promjene zabilježene su u smjeru vertikalne osi gdje vrijednost momenta varira od -116,64 Nm do 848,03 Nm.

Kutovi između karakterističnih dijelova tijela ukazuju na položaj kralješnice. Analizom položaja kralješnice za vrijeme stajanja moguće je uočiti eventualne nepravilnosti u držanju ili čak deformacije kralješnice. Budući da video zapis stajanja traje određeno vrijeme, jasno je da će se kut mijenjati, stoga nije moguće odrediti točan iznos kuta. Analiza se temelji na usporedbi kutova između lijeve i desne strane i uočavanju velikih odstupanja od obrasca promjene kuta. Naravno, ljudsko tijelo nije u potpunosti simetrično pa niti grafovi za isti dio tijela neće biti potpuno isti za lijevu i desnu stranu.

Zbog gubitka markera u dijelu video zapisa nakon 2. sekunde, u grafovima se prikazuje nagli skok, pa se za realne vrijednosti kutova uzima period do 2. sekunde.

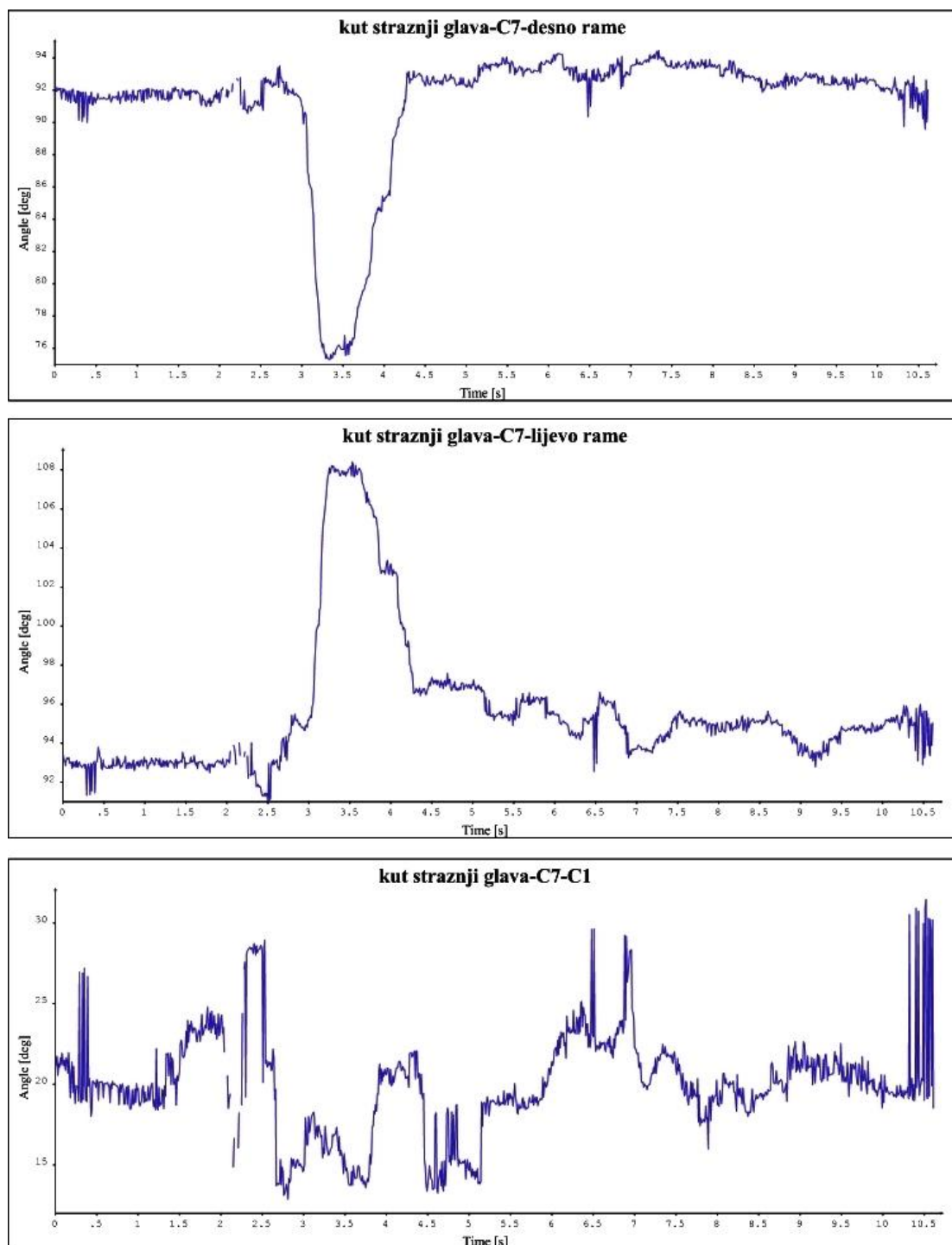
Kut koji prvi vratni kralješak zatvara s kralješkom C7 i lijevim odnosno desnim remenom pokazuje položaj ramena. Ukoliko se ti kutovi razlikuju, znači da je visina ramena različita, što može biti pokazatelj skolioze.



Slika 5.11. Položaj ramena u odnosu na vratnu kralješnicu

Iz slike 5.11. vidi se da kutovi nisu posve jednaki, no razlika je u granicama normale. Kut između kralješka C1 i desnog ramena varira od $76,8^\circ$ do $85,7^\circ$, a između C1 i lijevog ramena od $84,5^\circ$ do 93° . Dakle, desno rame više je približno 8° .

Položaj zatiljka (marker stražnji glava) u odnosu na ramena i vratni segment kralješnice daje podatak o nagnutosti glave u jednu od strana. Položaj glave prema naprijed u odnosu na vertikalnu liniju može upućivati na kifoza, dok je glava zabačena unatrag pokazatelj lordoze. Ukoliko se kut zatiljka s lijevim i desnim ramenom znatno razlikuju (nakrivljenost glave u stranu), to može biti posljedica skolioze.

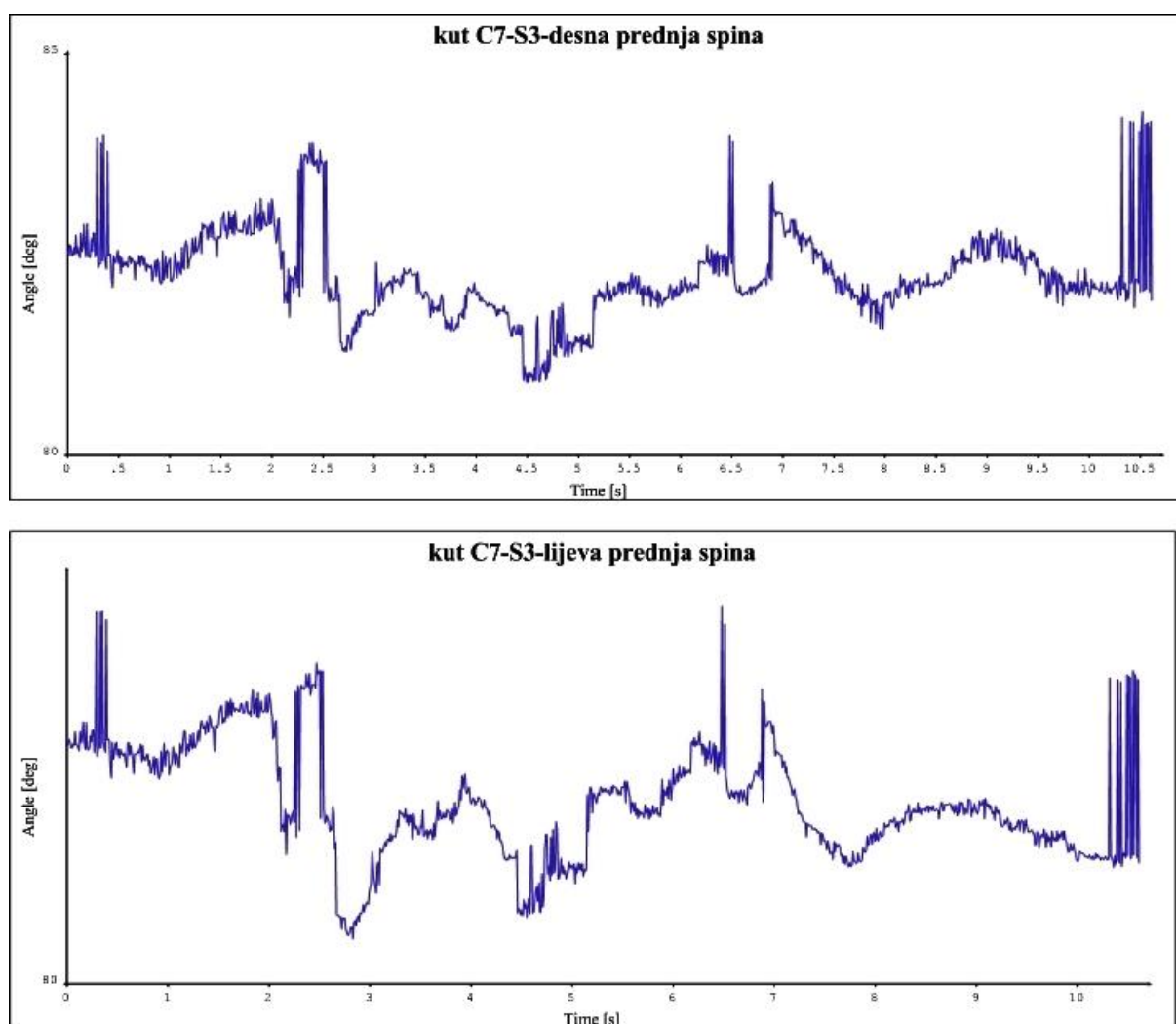


Slika 5.12. Položaj zatiljka u odnosu na ramena i vratnu kralješnicu

Iz slike 5.12. vidi se da je položaj glave u odnosu na ramena gotovo simetričan. Kut zatiljka u odnosu na desno rame varira od 90° do $92,2^\circ$, a u odnosu na lijevo rame od $91,3^\circ$ do $93,8^\circ$. Kut zatiljka u odnosu na vratni segment kralješnice kreće se od 18° do $27,2^\circ$.

Položaj prsnog i slabinskog segmenta kralješnice promatra se u odnosu na položaj prednjih spina, a vrh kuta je u kralješku S3.

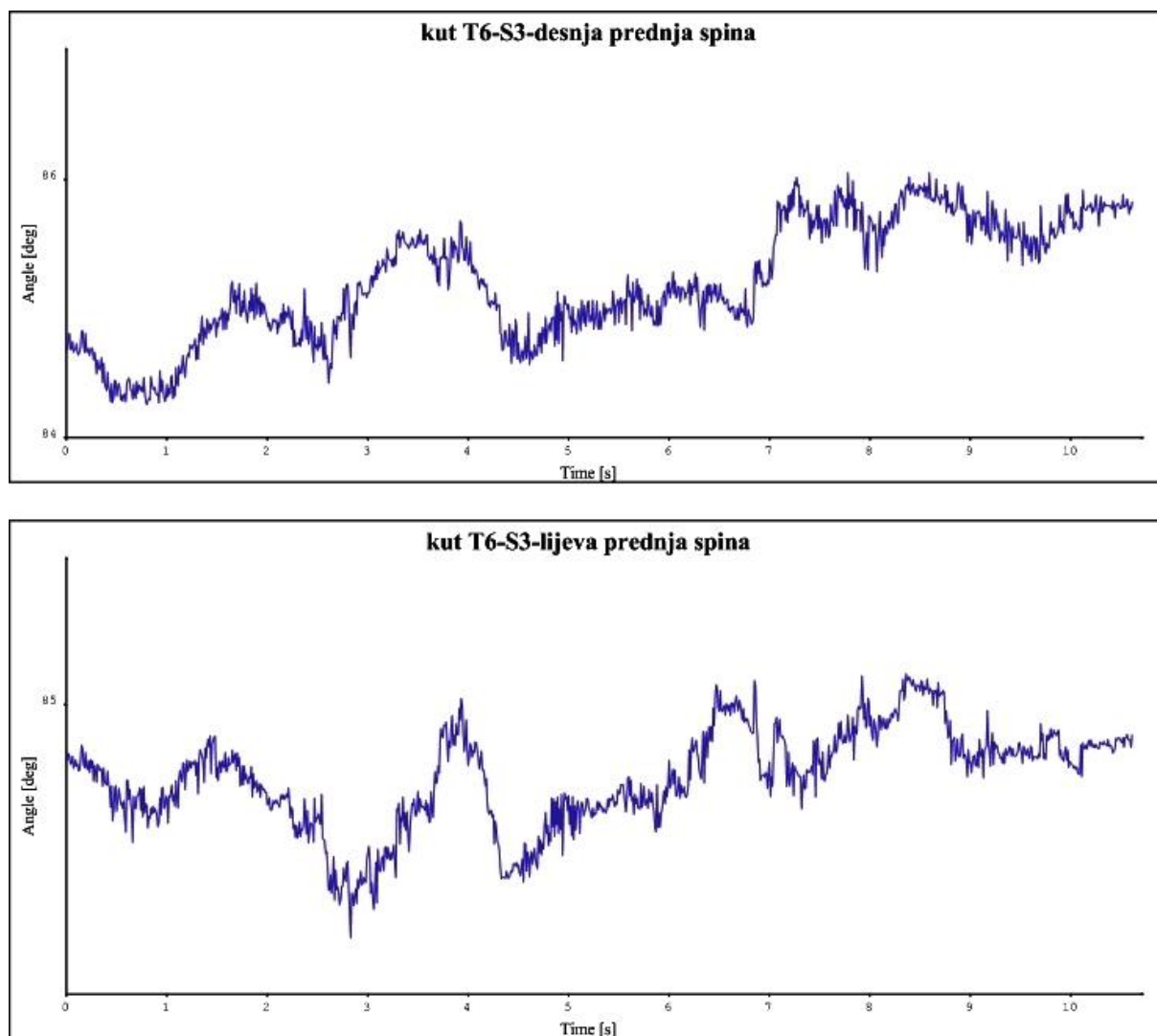
Kut između kraljeka C7 i prednjih spina, pokazuje položaj trupa u odnosu na zdjelicu. Manji kut znači da je ispitanik nagnut prema naprijed, i obrnuto. Razlika kutova na lijevoj i desnoj strani upućuje na iskrivljenost kralješnice u stranu gdje je kut manji.



Slika 5.13. Položaj kraljeka C7 u odnosu na prednje spine

Iako postoje promjene kuta u vremenskom periodu stajanja, iz slike 5.13. vidi se da su obrasci promjene kuta kraljeka C7 u odnosu na prednje spine gotovo identični. Kut prema desnoj prednjoj spini kreće se od 82° do $83,9^\circ$, a prema lijevoj od $82,4^\circ$ do $84,5^\circ$.

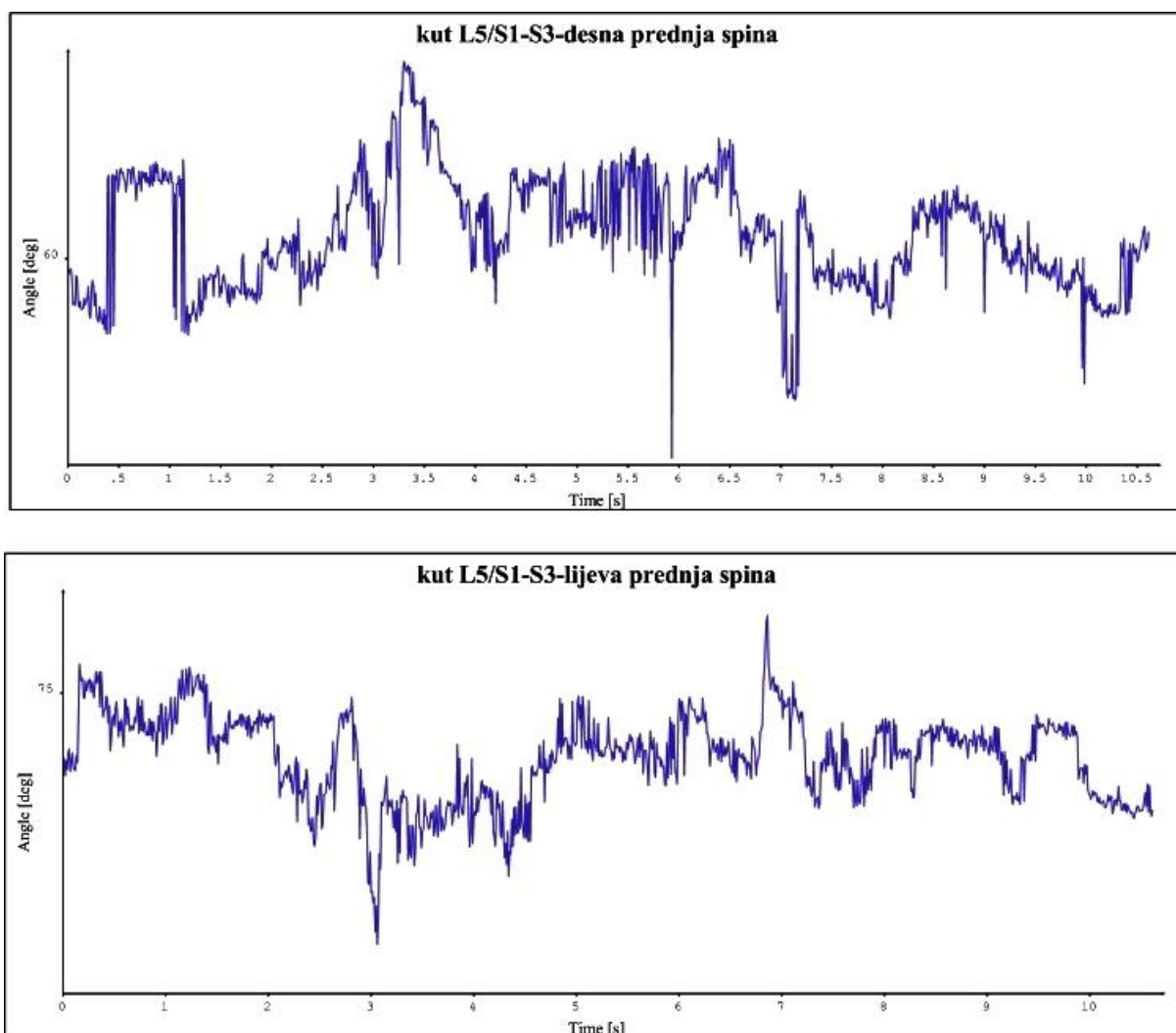
Položaj kralješka T6 može biti pokazatelj kifoze i lordoze. Naime, velik kut između kralješka T6 i prednjih spina upućuje na izbočenje prsnog segmenta kralješnice prema natrag (kifoza), a mali kut upućuje na udubljenje prsnog segmenta kralješnice (lordoza).



Slika 5.14. Položaj kralješka T6 u odnosu na prednje spine

Kut kralješka T6 prema desnoj prednjoj spini kreće se između $84,2^{\circ}$ do $85,2^{\circ}$, a prema lijevoj između 84° i $84,7^{\circ}$.

Položaj kralješka L5 u odnosu na prednje spine, pokazatelj je lordoze. Mali kut ukazuje na pomak slabinskog dijela prema naprijed.



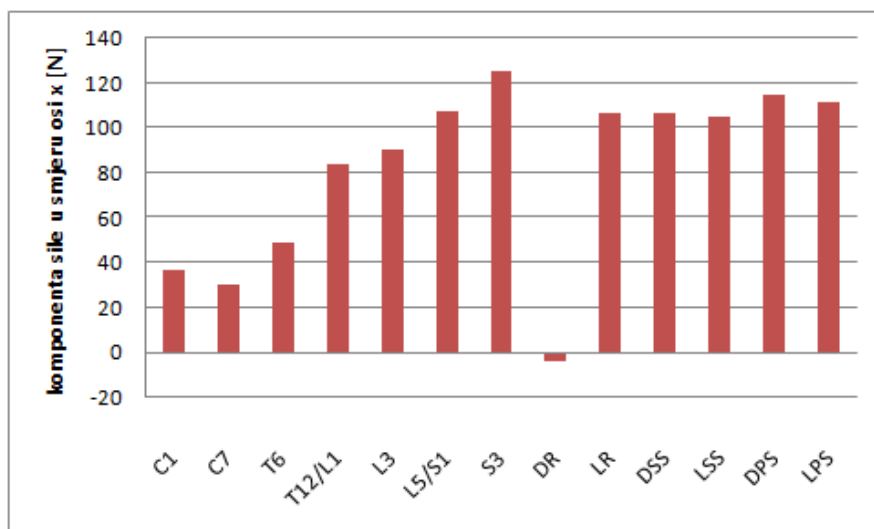
Slika 5.15. Položaj slabinskog dijela kralješnice u odnosu na prednje spine

Kut slabinskog segmenta s desnom prednjom spinom manji je od kuta s lijevom prednjom spinom i kreće se od 57° do 63° , dok je veličina kuta na lijevoj strani od 72° do 74° . Razlika ukazuje na blagi nagib u desnu stranu.

5.2. Analiza hoda

Analiza biomehanike kralješnice za vrijeme hodanja daje podatke o opterećenosti kralješnice i položaju ramena i prednjih spina u odnosu na kralješnicu. Promjene opterećenja i položaja tijekom hodanja su cikličke. Jednim ciklusom smatra se jedan korak, odnosno trenutak od kontakta pete jedne noge s podlogom do sljedećeg kontakta pete te iste noge s podlogom. Video zapis hodanja koji se koristi u ovoj analizi traje 4 sekunde. Za usporedbu opterećenja u dijelovima tijela označenim markerima, odabran je trenutak kontakta ispitanika s platformom tj. 2. sekunda video zapisa.

Opterećenje silom:

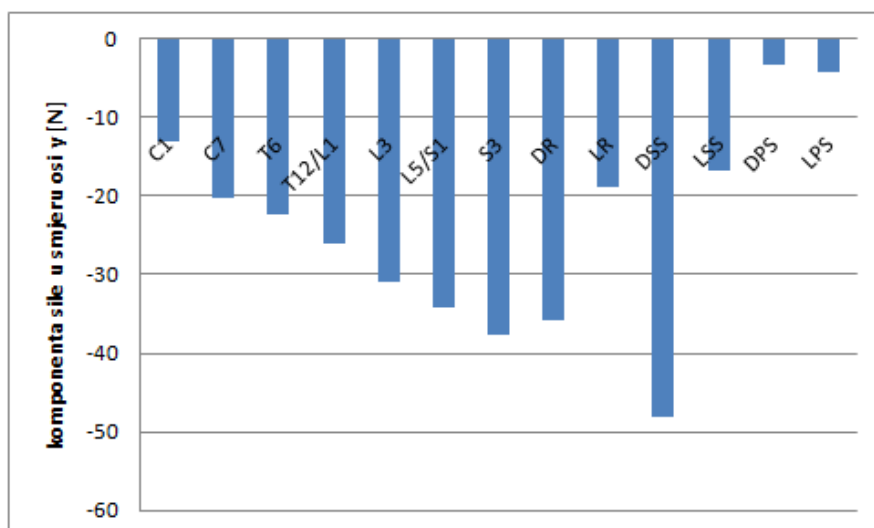


Slika 5.16. X komponenta sile u trenutku kontakta s platformom

Tablica 5.7. Iznos x komponente sile u trenutku kontakta s platformom

mjesto postavljanja markera	sila [N]	mjesto postavljanja markera	sila [N]
C1	37,123	desno rame	-3,830
C7	30,044	lijevo rame	106,433
T6	48,893	desna stražnja spina	106,811
T12/L1	83,875	lijeva stražnja spina	105,211
L3	90,770	desna prednja spina	114,430
L5/S1	107,424	lijeva prednja spina	111,863
S3	125,387		

U smjeru osi x, najviše je opterećen kralješak S3, a najmanje desno rame. Opterećenje raste od kralješka C7 do kralješka S3, dok su opterećenja na spinama podjednaka što je pokazatelj pravilnog hoda. Sila u kralješku C1 je veća od sile u kralješku C7 što je posljedica težine glave. Valja primijetiti da je sila u desnom ramenu usmjerena u smjeru suprotnom od ostalih, što je posljedica rotacije ramena tijekom hodanja.

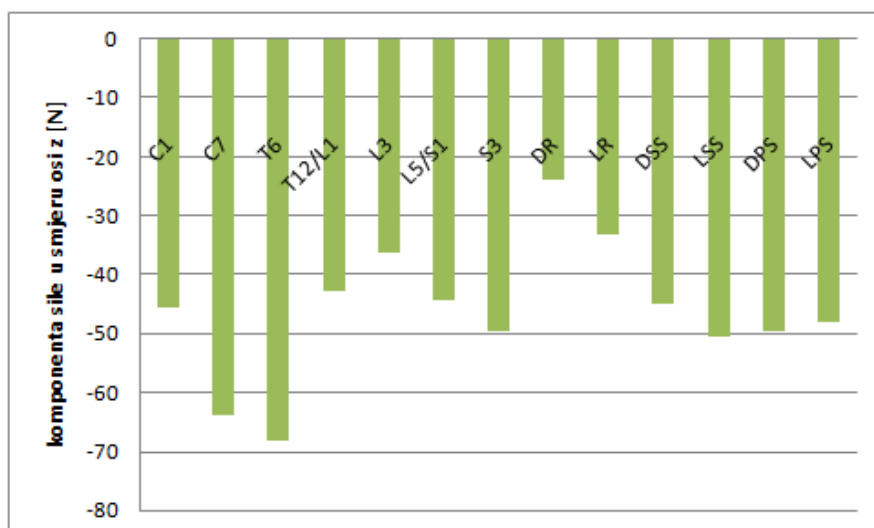


Slika 5.17. Y komponenta sile u trenutku kontakta s platformom

Tablica 5.8. Iznos y komponente sile u trenutku kontakta s platformom

mjesto postavljanja markera	sila [N]	mjesto postavljanja markera	sila [N]
C1	-13,084	desno rame	-35,804
C7	-20,171	lijevo rame	-18,882
T6	-22,350	desna stražnja spina	-48,047
T12/L1	-25,950	lijeva stražnja spina	-16,735
L3	-31,043	desna prednja spina	-3,261
L5/S1	-34,110	lijeva prednja spina	-4,244
S3	-37,769		

U promatranom trenutku, navije je opterećena desna stražnja spina, a najmanje desna prednja spina. Također, desno rame je više opterećeno od lijevog. Takva raspodjela opterećenja je posljedica toga što je ispitanik u promatranom trenutku oslonjen na desnu nogu.



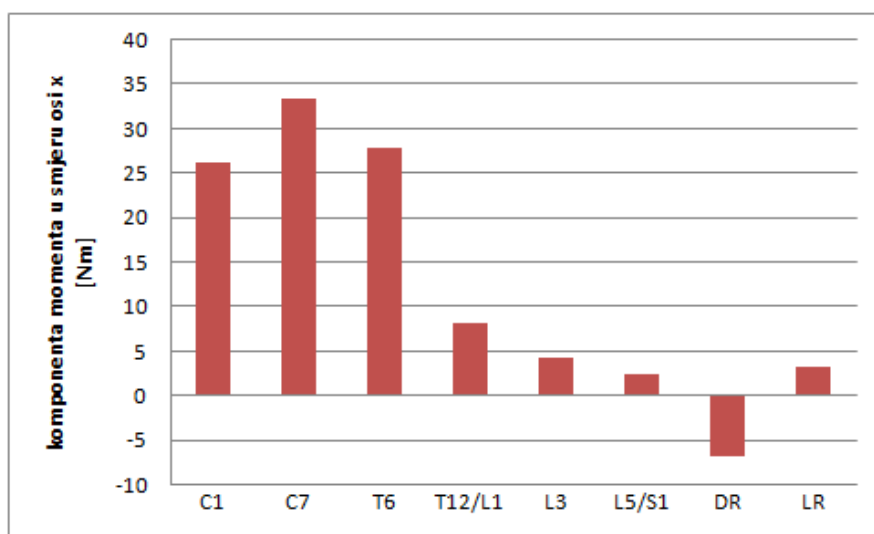
Slika 5.18. Z komponenta sile u trenutku kontakta s platformom

Tablica 5.9. Iznos z komponente sile u trenutku kontakta s platformom

mjesto postavljanja markera	sila [N]	mjesto postavljanja markera	sila [N]
C1	-45.707	desno rame	-23,822
C7	-63.967	lijevo rame	-33,191
T6	-68.081	desna stražnja spina	-44,875
T12/L1	-42.670	lijeva stražnja spina	-50,560
L3	-36.419	desna prednja spina	-49,587
L5/S1	-44,318	lijeva prednja spina	-48,201
S3	-49,629		

U smjeru osi z, najviše je opterećen kralješak T6, a najmanje desno rame. Takva raspodjela opterećenja je posljedica rotacije gornjeg dijela tijela u tijeku hodanja.

Opterećenje momentom:

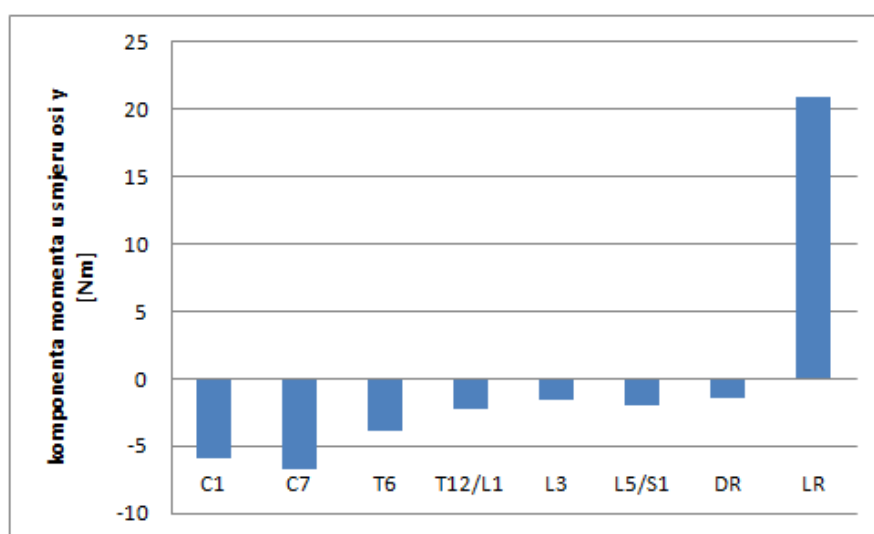


Slika 5.19. X komponenta momenta u trenutku kontakta s platformom

Tablica 5.10. Iznos x komponente momenta u trenutku kontakta s platformom

mjesto postavljanja markera	moment [Nm]	mjesto postavljanja markera	moment [Nm]
C1	26,298	L3	4,132
C7	33,500	L5/S1	2,259
T6	27,806	desno rame	-6,919
T12/L1	8,068	lijevo rame	3,078

U smjeru osi x, najvećim momentom opterećen je kralješak C7, a najmanjim prijelaz između slabinskog i križnog segmenta kralješnice L5/S1. Kao i sila u smjeru osi x, i moment u desnom ramenu je usmjeren suprotno od ostalih.

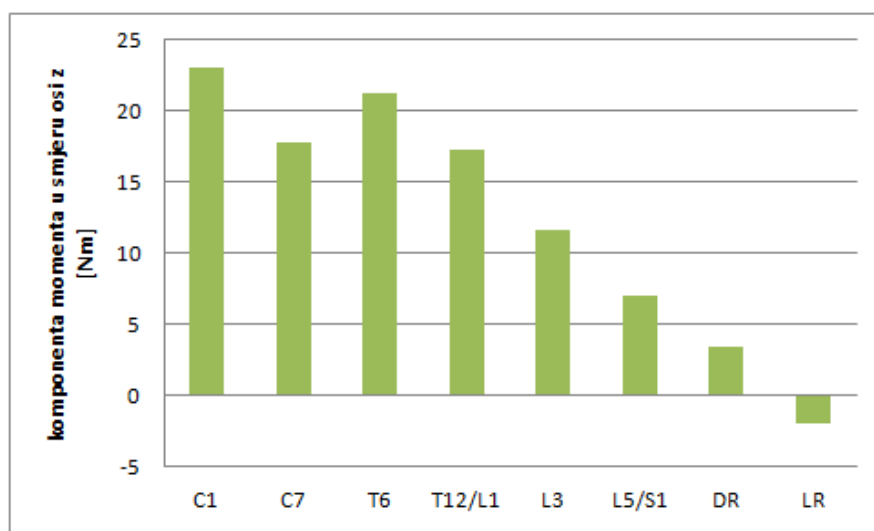


Slika 5.20. Y komponenta momenta u trenutku kontakta s platformom

Tablica 5.11. Iznos y komponente momenta u trenutku kontakta s platformom

mjesto postavljanja markera	moment [Nm]	mjesto postavljanja markera	moment [Nm]
C1	-5,933	L3	-1,546
C7	-6,720	L5/S1	-1,934
T6	-3,936	desno rame	-1,471
T12/L1	-2,311	lijevo rame	20,954

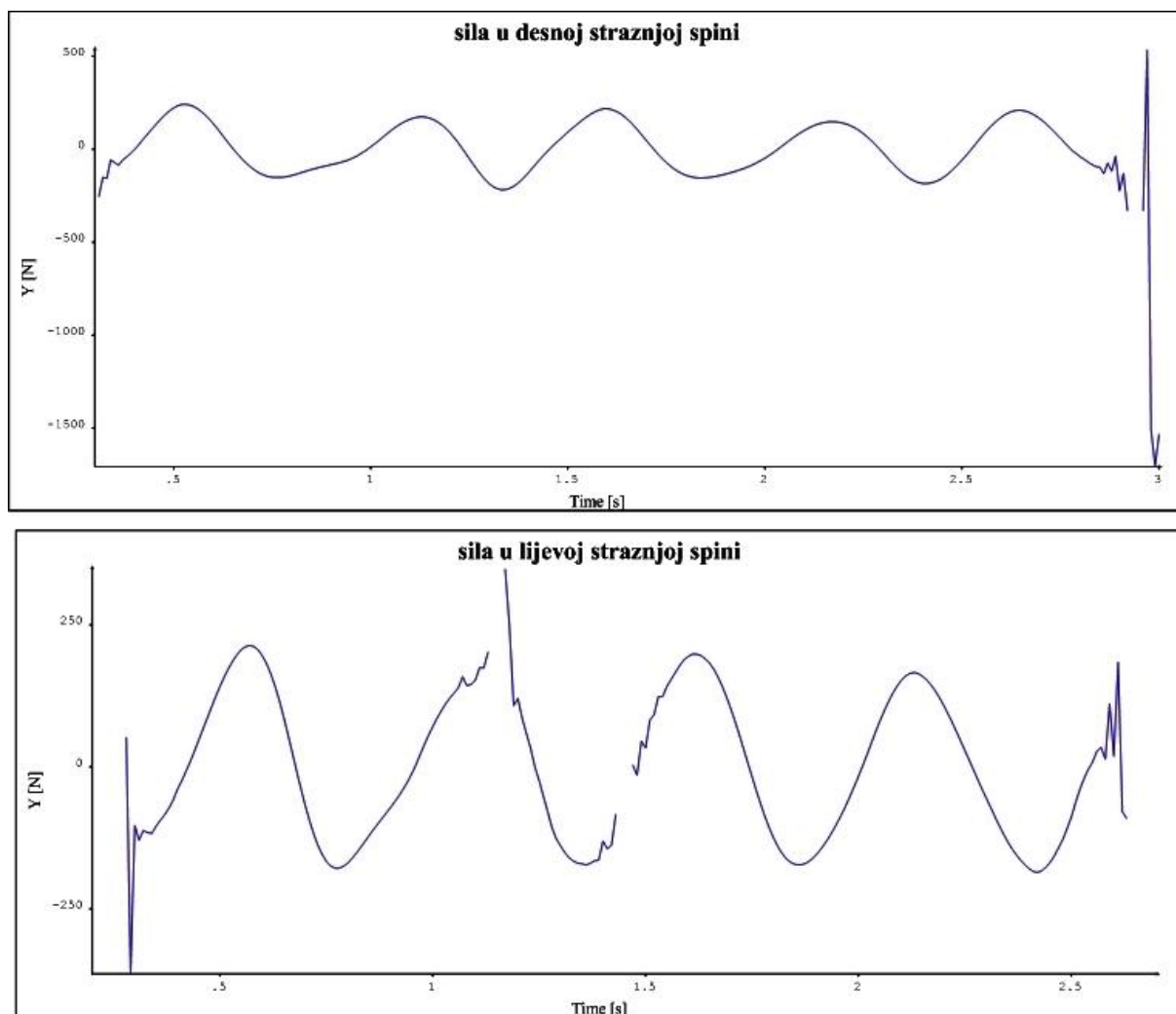
Moment u smjeru osi y se smanjuje od kralješka C7 prema prijelazu L5/S1, a najveći je u lijevom ramenu koje je u trenutku oslanjanja na desnu nogu najudaljenije od točke rotacije.

**Slika 5.21. Z komponenta momenta u trenutku kontakta s platformom****Tablica 5.12. Iznos z komponente momenta u trenutku kontakta s platformom**

mjesto postavljanja markera	moment [Nm]	mjesto postavljanja markera	moment [Nm]
C1	23,058	L3	11,616
C7	17,854	L5/S1	6,964
T6	21,261	desno rame	3,324
T12/L1	17,265	lijevo rame	-2,046

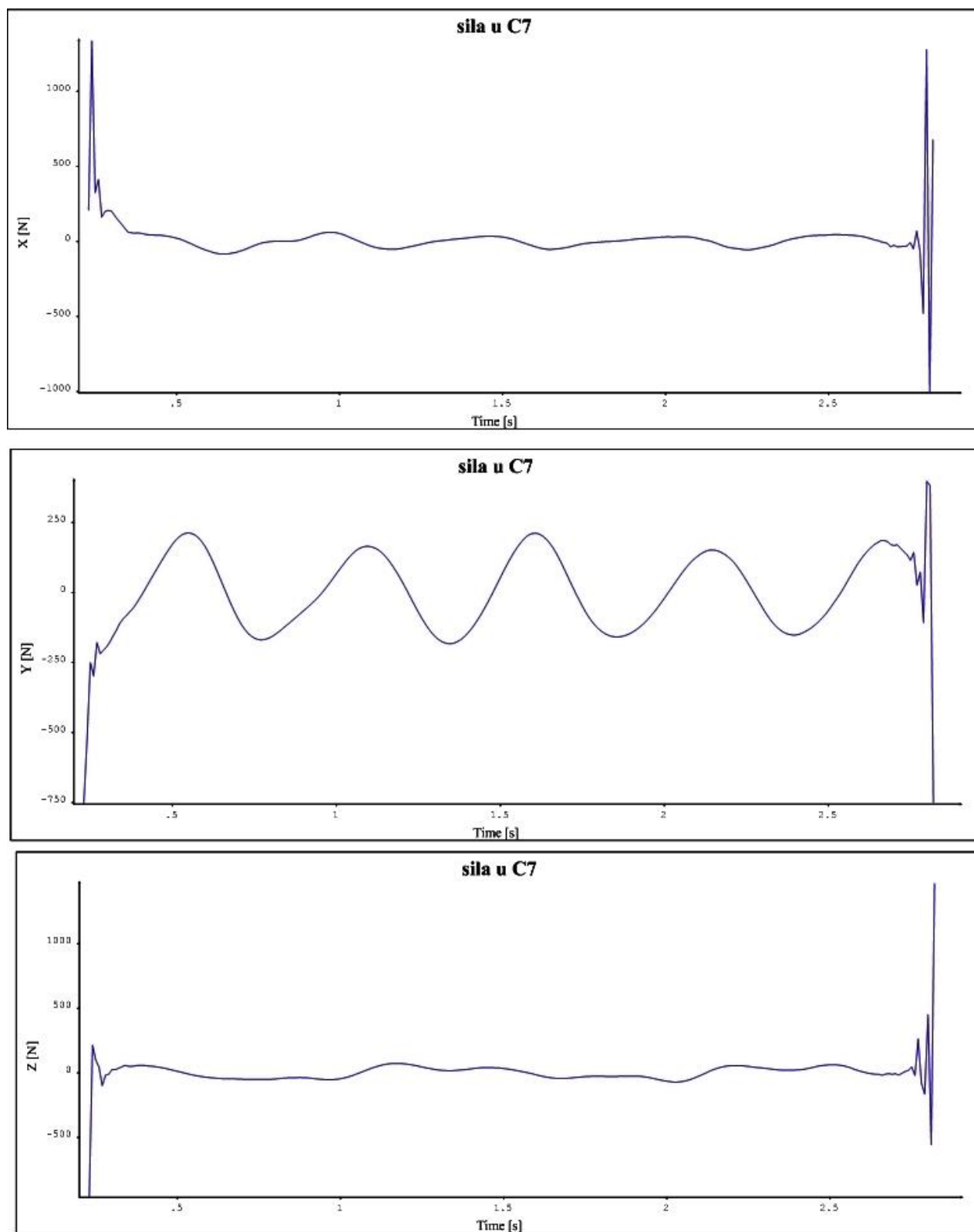
U smjeru osi z, najviše je opterećen kralješak C1, a najmanje lijevo rame. Moment se smanjuje duž kralješnice od kralješka T6 prema prijelazu L5/S1.

Tijekom snimanja, ispitanik hoda kroz radni prostor prateći oznake. Budući da obrazac hoda treba biti što prirodniji, ispitanik kreće s oznake izvan radnog prostora te postepeno ulazi u radni prostor. Zbog toga se u grafovima koji pokazuju promjenu opterećenja u tijeku hodanja na samom početku i kraju vidi skok vrijednosti, dok je ostatak krivulje cikličnost. Zbog povremenog nestanka pojedinih markera na video zapisu, odlučeno je da se realnim smatra dio krivulje od 1,47 s do 2,5 s. Slike 5.22., 5.23., 5.24., i 5.25. prikazuju promjenu opterećenja u karakterističnim točkama tijela.



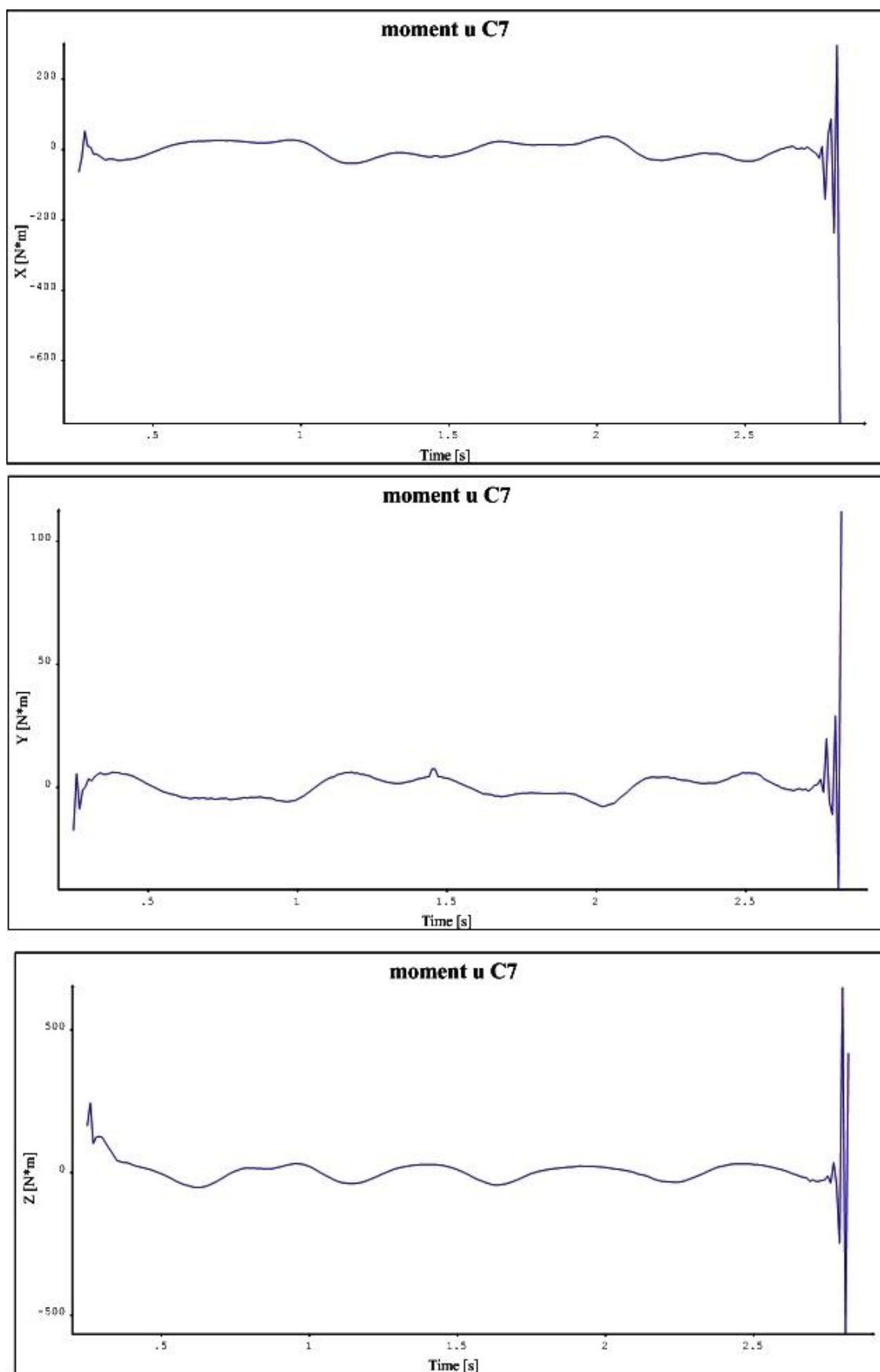
Slika 5.22. Sila u smjeru y osi na stražnjim spinama

Sila u stražnjim spinama u smjeru osi y , mijenja se ciklički na obje strane i kreće se unutar približno jednakih vrijednosti (zbog skokova na početku i kraju grafa mjerilo nije isto).

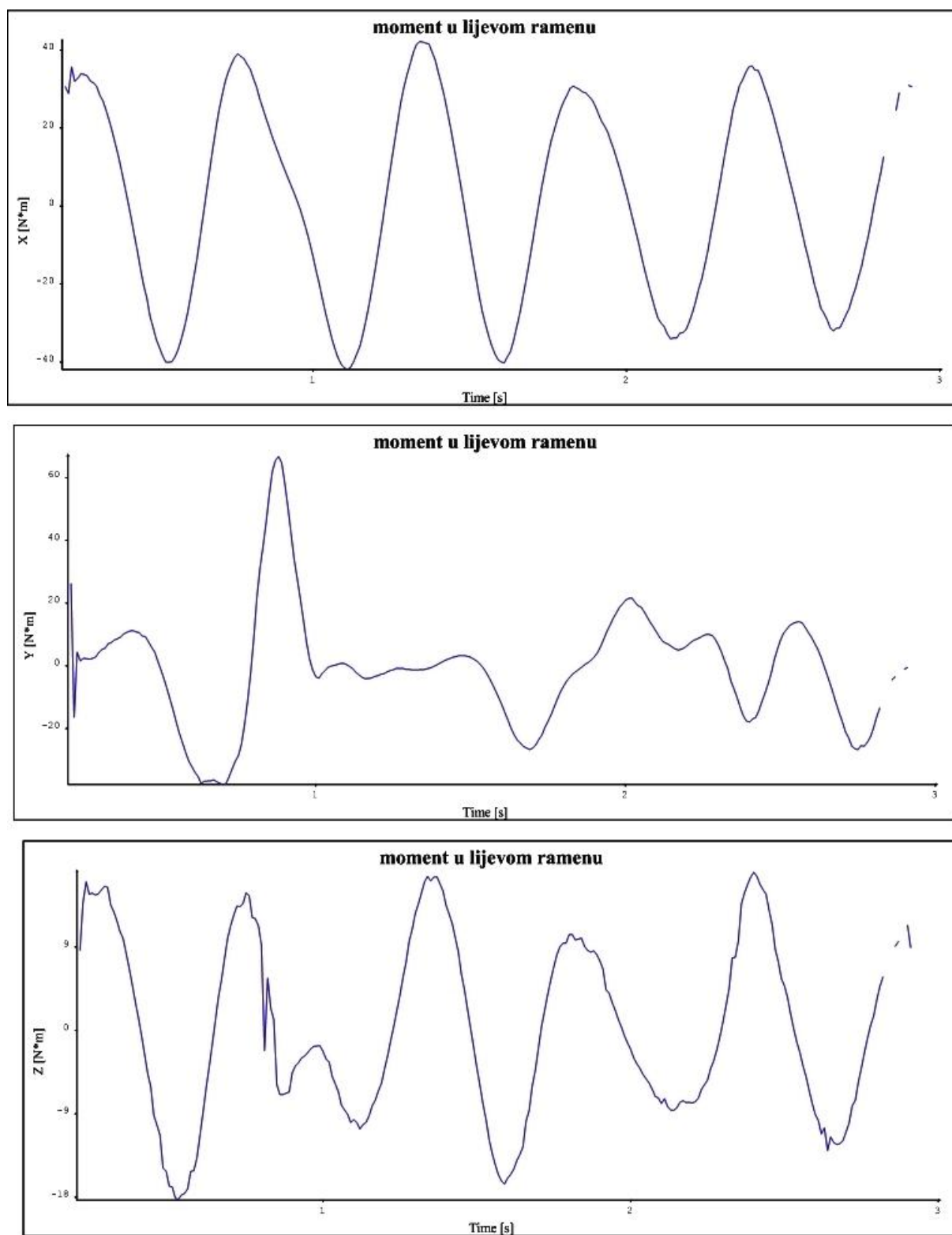


Slika 5.23. Promjena sile u kralješku C7

Udaljenost između dva susjedna vrha krivulje promjene predstavlja jedan korak.

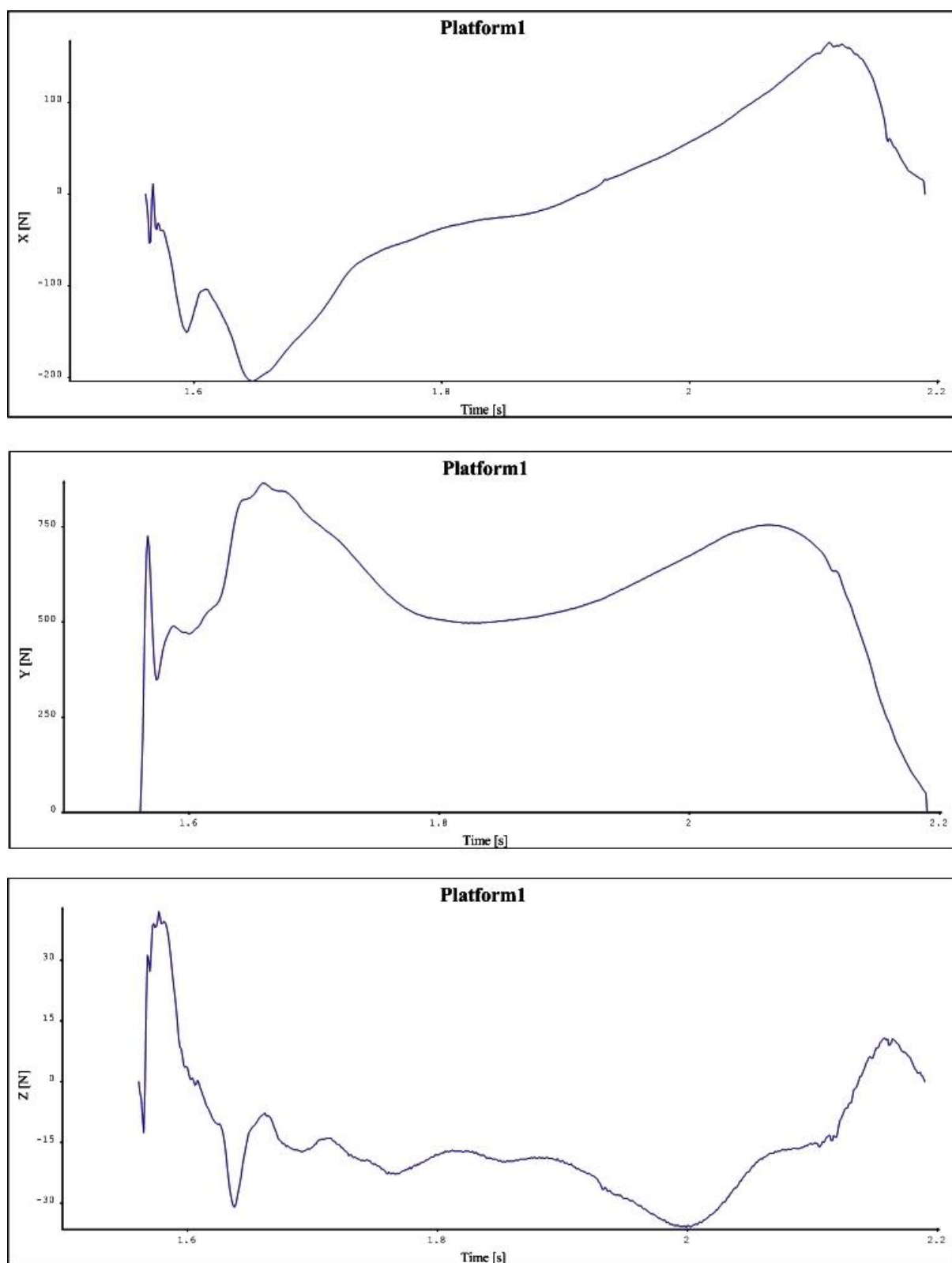


Slika 5.24. Promjena momenta u kralješku C7

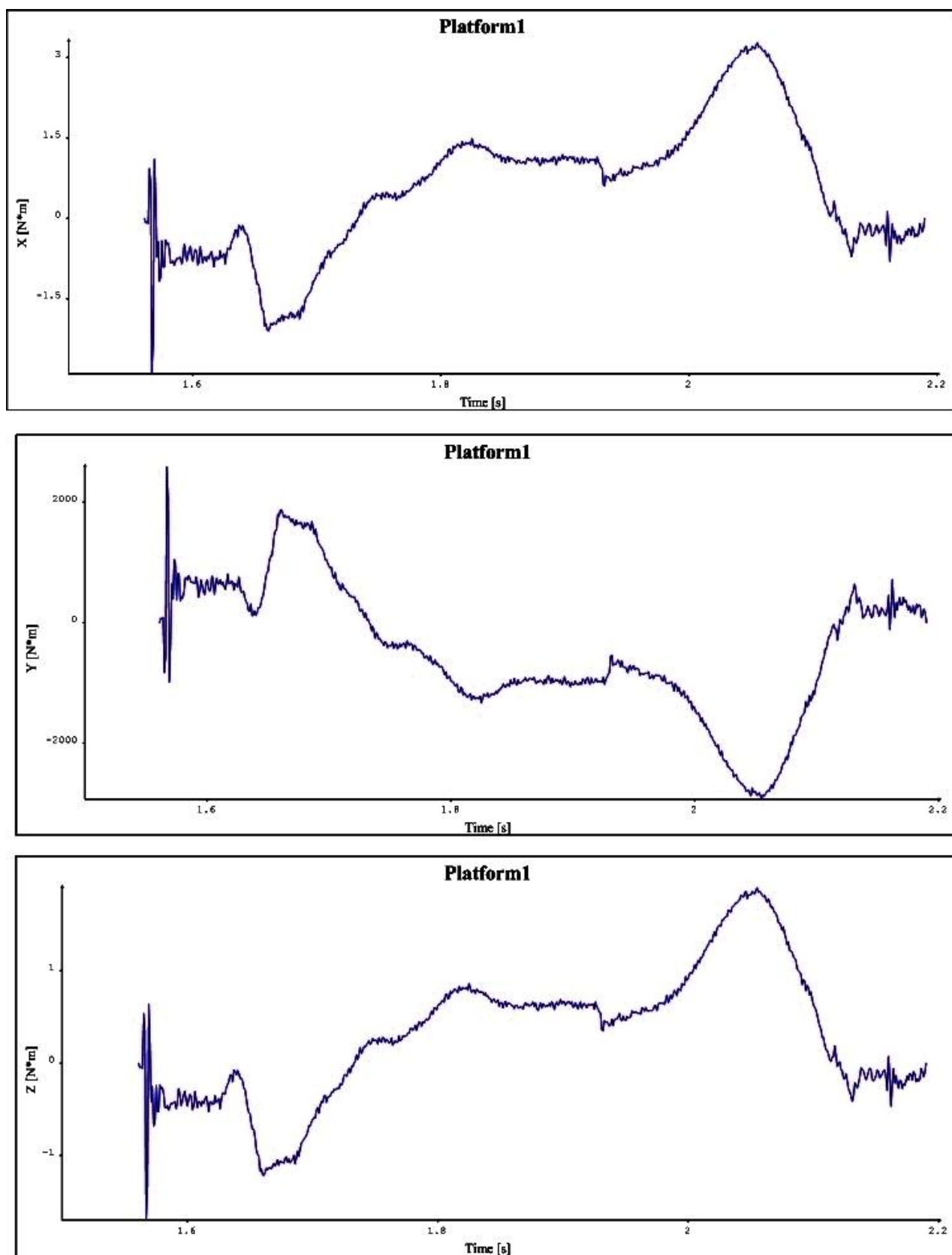


Slika 5.25. Promjena momenta u lijevom ramenu

Za razliku od analize stajanja gdje ispitanik cijelo vrijeme stoji na platformi, kod hodanja su promjene reakcije podloge puno izraženije.



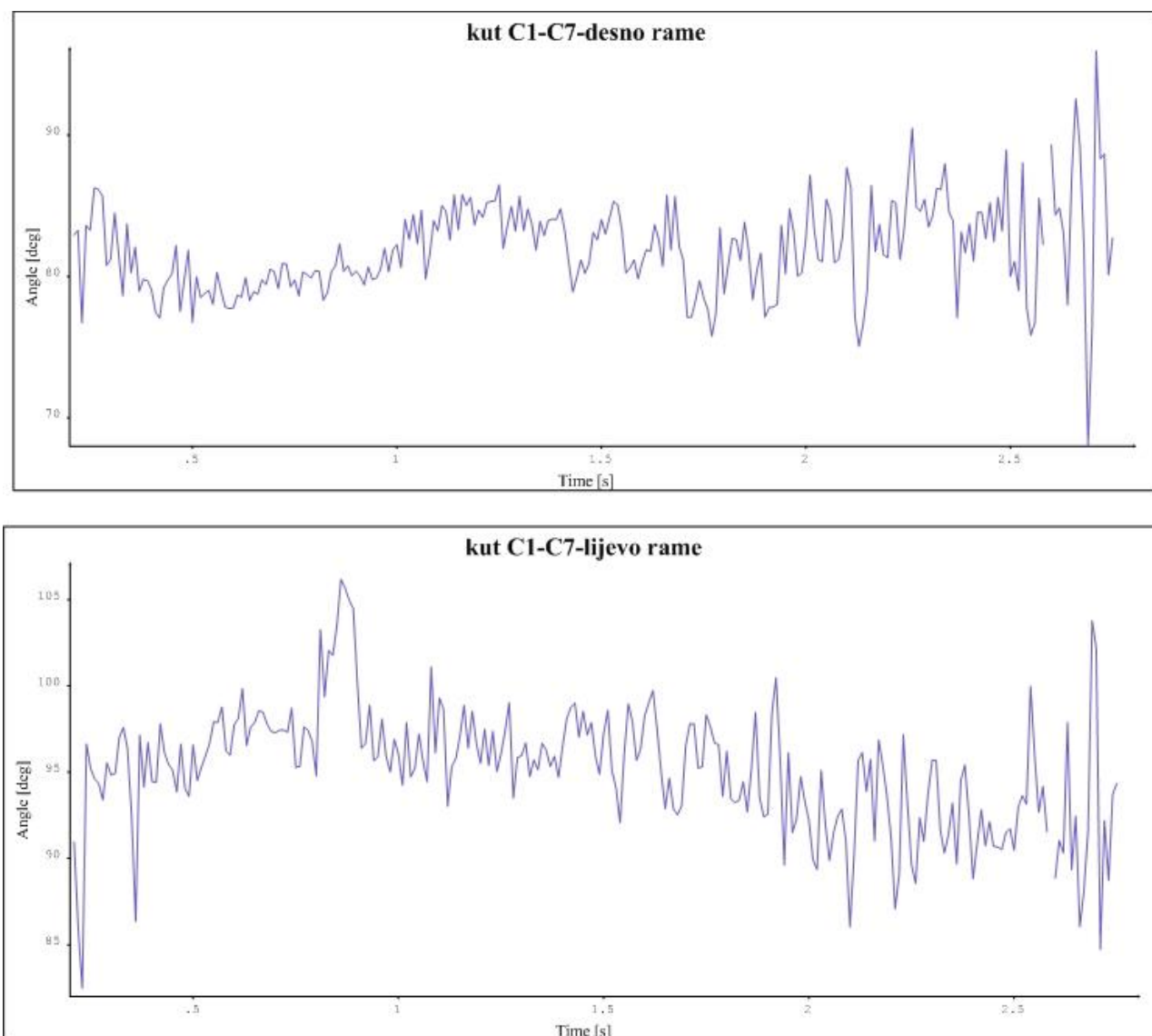
Slika 5.26. Promjena sile na platformi



Slika 5.27. Promjena momenta na platformi

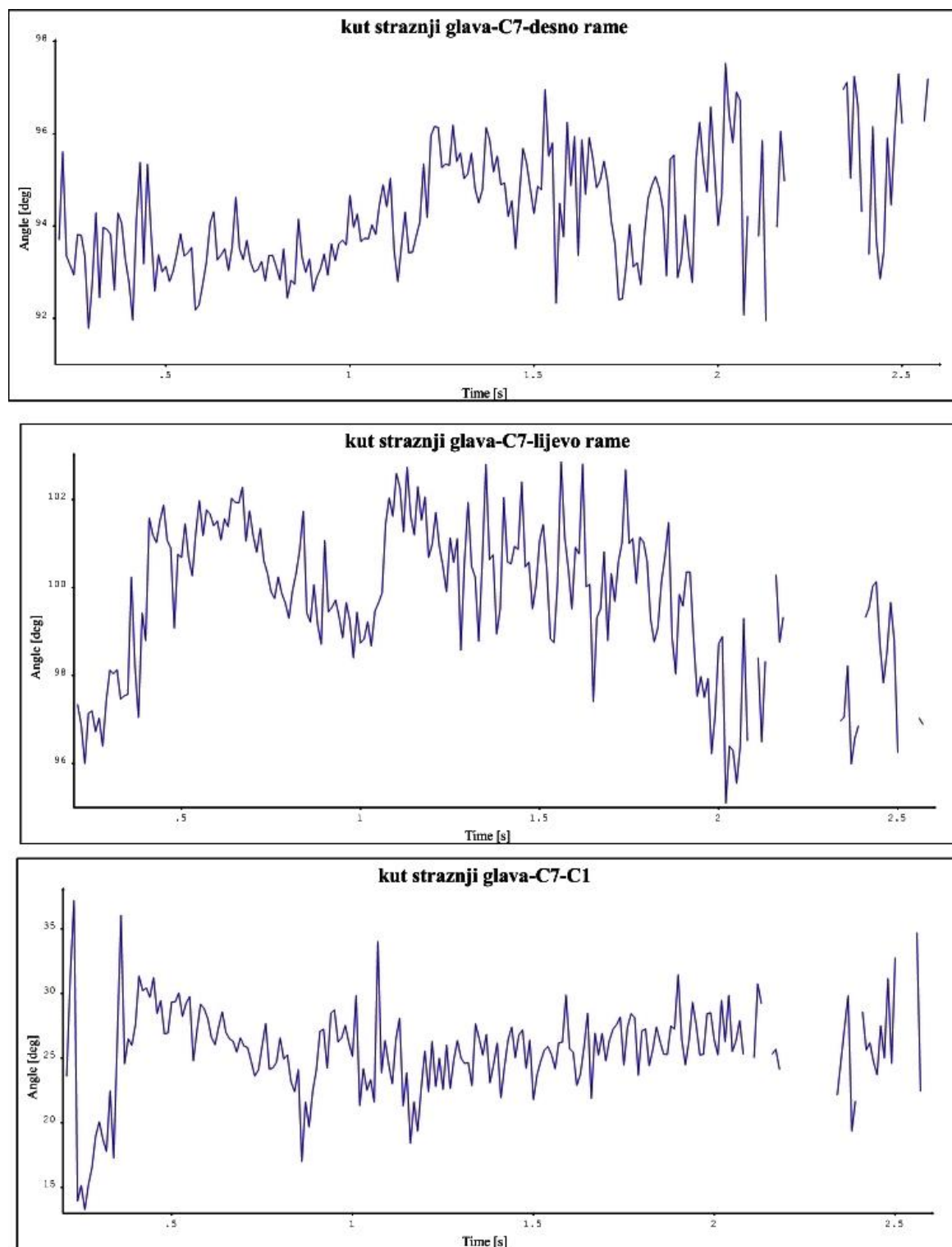
Položaj glave, ramena i kralješnice za vrijeme hodanja mogu ukazati na deformacije kralješnice ili nejednoliko hodanje.

Kutovi između prvog vratnog kralješka C1 i ramena ukazuju na položaj ramena tijekom hodanja. Razlika u visini desnog i lijevog ramena karakteristika je nepravilnog položaja trupa za vrijeme hodanja.



Slika 5.28. Promjena položaja ramena u odnosu na vratnu kralješnicu

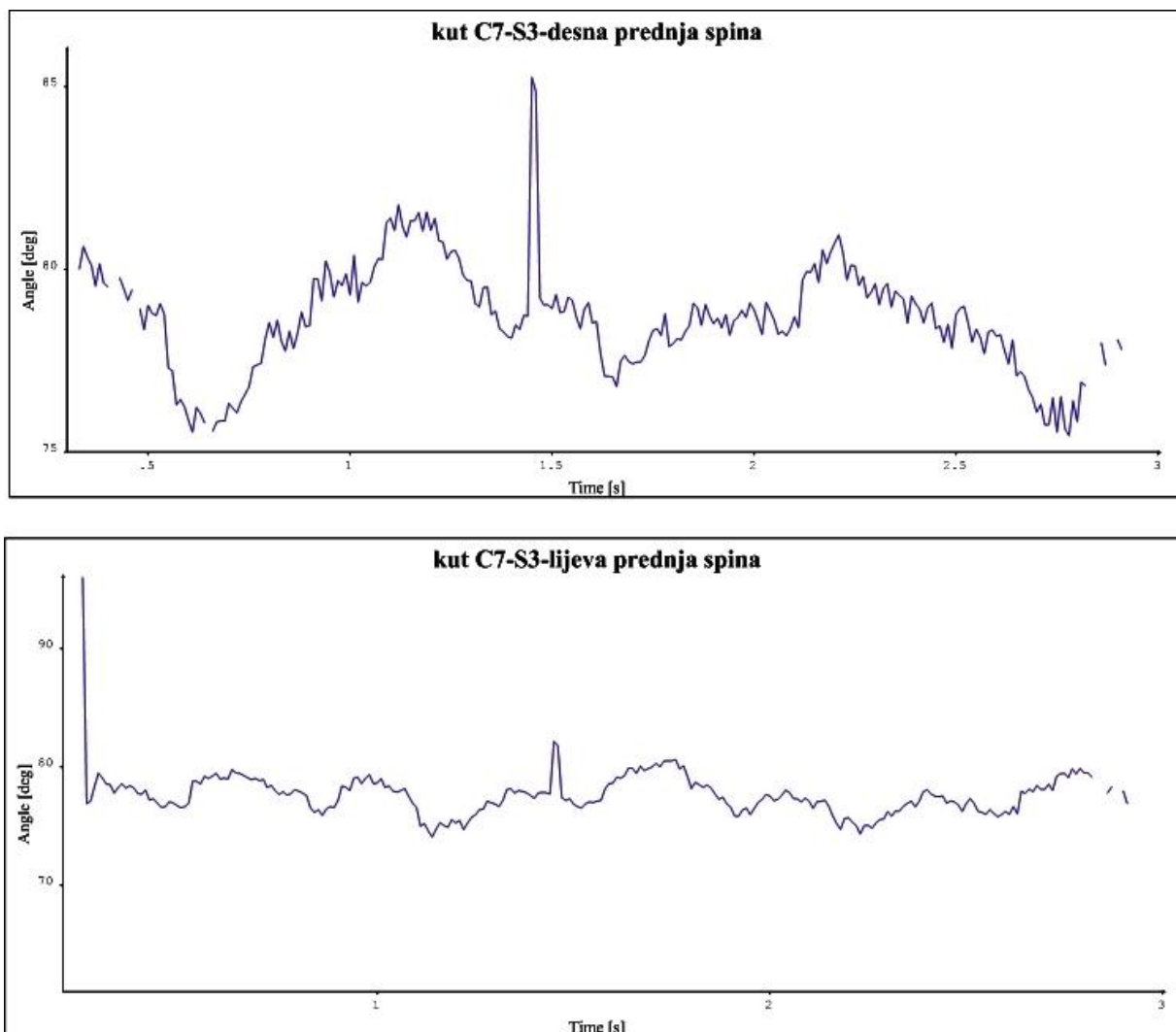
Krivulje promjene kuta desnog i lijevog ramena u odnosu na vratnu kralješnicu su različite. Kut između kralješka C1 i desnog ramena kreće se od 75° do $90,5^\circ$, a između kralješka C1 i lijevog ramena od 86° do $100,5^\circ$. Razlika u visini ramena uočena je već kod analize stajanja, što znači da nema dodatnih odstupanja tijekom hodanja. Pravilno držanje tijekom hodanja potvrđuje jednak interval promjene kuta s obje strane od približno 15° .



Slika 5.29. Promjena položaja zatiljka u odnosu na ramena i vratnu kralješnicu

Iz položaja zatiljka u odnosu na desno i lijevo rame, uočava se razlika u kutovima. Kut između zatiljka i desnog ramena kreće se od 92° do 98° , a između zatiljka i lijevog ramena od 95° do 103° . Razlika između kutova je približno 4° .

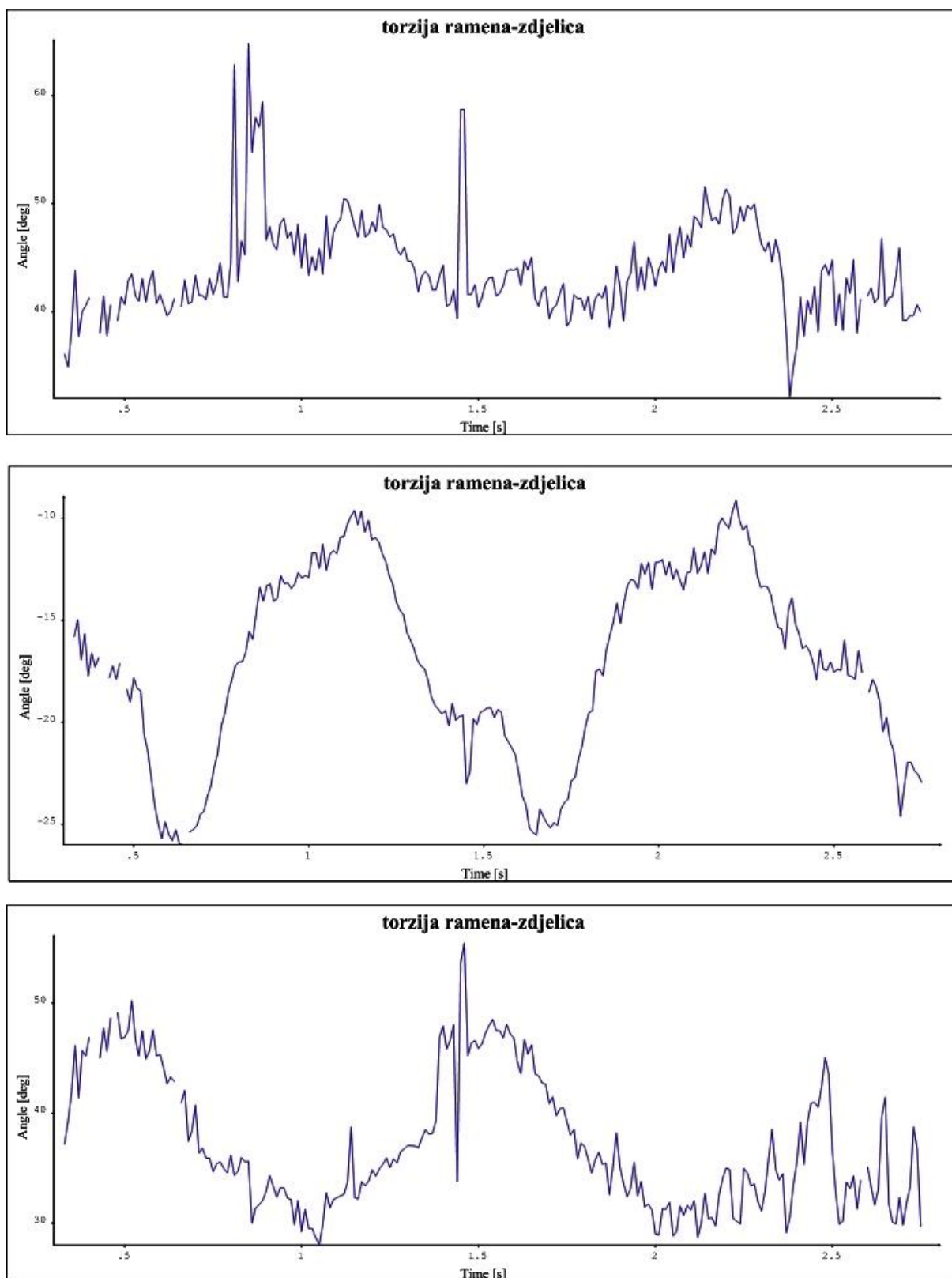
Kut između zatiljka i vratne kralješnice mijenja se u intervalu od $19,3^\circ$ do $31,5^\circ$. Interval promjene je veći nego kod stajanja, što je posljedica jačeg gibanja glave naprijed-natrag pri hodaњу.



Slika 5.30. Promjena položaja kralješka C7 u odnosu na prednje spine

U promatranom periodu kut između kralješka C7 i desne prednje spine mijenja se od $76,8^\circ$ do $80,9^\circ$, a između kralješka C7 i lijeve prednje spine od $74,3^\circ$ do $80,6^\circ$. Razlika u kutovima je zanemariva, što ukazuje na pravilan položaj kralješnice tijekom hodaņa.

Osim opterećenja i kutova između pojedinih točaka tijela, kod analize biomehanike hoda moguće je odrediti i torziju kralješnice. Torzija se prikazuje kao trodimenzionalni kut između referentnih ravnina. Jedna referentna ravnina određena je ramenima i kralješkom C7, a druga prednjim spinama i kralješkom S3.



Slika 5.31. Torzija kralješnice

Iako se kutovi u svim ravninama značajno mijenjaju, moguće je uočiti obrazac ponavljanja.

6. Zaključak

Izrađeni protokol za analizu biomehanike kralješnice, daje podatke o opterećenju i položaju kralješnice koji se koriste u analizama utjecaja određenih pokreta na kralješnicu. Budući da je moguće analizirati gotovo svaki pokret ljudskog tijela, analiza biomehanike pokreta primjenjiva je u ergonomiji, medicini rada, izradi implantata, sportskoj medicini...

Analiza biomehanike kralješnice pomoću BTS Elite mjernog sustava je neinvazivna i relativno brza metoda određivanja biomehanike kralješnice. Poznato je da isti pokret svaki pojedinac obavlja različito, te da su i opterećenja različita. BTS Elite mjerni sustav omogućava izradu protokola, a izrađeni protokol može se primijeniti na bilo kojeg ispitanika. Kod izrade protokola bitno je unaprijed odrediti koji se podaci se žele dobiti i prema tome postaviti markere. Pri postavljanju markera treba obratiti pažnju na udaljenost između susjednih markera, kako bi ih u svakom trenutku ispitivanja mjerni sustav mogao prepoznati i pratiti. Na primjerima analiziranim u okviru ovog rada, vidi se kako nestanak markera u nekom trenutku može utjecati na izgled krivulje i rasipanje rezultata. S druge strane, rezultati dobiveni u periodu gdje su svi markeri vidljivi, vrlo su precizni pa se svaka i najmanja promjena položaja ili opterećenja vrlo lako uočava.

Nedostatak u primjeni BTS Elite mjernog sustava su markeri koji se koriste. Njihov oblik ne omogućava njihovo postavljanje izravno na površinu tijela, već su od tijela udaljeni 1 do 2 cm. Također, zbog zasjenjivanja markera u slučaju kada su postavljeni preblizu, nije moguće postaviti ih na svaki mobilni segment tijela, što bi dalo precizniju analizu biomehanike kralješnice.

Sustav za analizu biomehanike ima važnu ulogu u praćenju oporavka pacijenata. Usporedbom stanja prije i poslije rehabilitacije, moguće je procijeniti koliko je terapija uspješna. Također, vrlo je koristan u dijagnozi fizičkih nepravilnosti, koje su ponekad toliko male da se ne primjećuju golim okom. Upravo pravovremeno utvrđivanje nepravilnosti kralješnice može povećati mogućnost oporavka i tako smanjiti broj operativnih zahvata.

7. Literatura

- [1] http://www.health.qld.gov.au/qscis/pdf/handbook_of_spinal_cord_injuries/handbook_of_spinal_cord_injuries.pdf
- [2] <http://www.harms-spinesurgery.com/src/plugin.php?m=harms.INDEX&lang=en>
- [3] http://www.medri.uniri.hr/katedre/Kirurgiju/autorizirana%20predavanja/bajek/OZLJEDE_KRALJESNICE.pdf
- [4] http://pedagoskapraksa.ucoz.com/_ld/0/42_PRIMJERIKOREKTI.pdf
- [5] <http://cnx.org/content/m27924/latest/36-Reading%20-%20Rapoff.pdf>
- [6] <http://www.fitness.com.hr/zdravlje/ozljede-bolesti/Kifoza-i-lordoza.aspx>
- [7] <http://www.btsbioengineering.com>
- [8] <http://www.scribd.com/doc/70713142/Smart-Analyzer-Handbook>
- [9] Medved V, Kasović M.: Biomehanička analiza ljudskog kretanja u funkciji sportske traumatologije, Hrvat. Športskomed. Vjesn. 2007; 22: 40-47
- [10] Kasović, M. : Kinematika, 3D tehnologije u snimanja pokreta, predavanja, KIF, 2012.
- [11] Tonković, D.: Analiza kretanja čovjeka, Zagreb